

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra výrobních strojů a konstruování

Analýza technických parametrů a technická diagnostika pecí pro tlakové lití
Analysis of Technical Parameters and Technical Diagnosis of Furnaces for
Pressure Casting

Student:	Jan Ziffer
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Jan Blata, Ph.D.

Ostrava 2012

Zadání bakalářské práce

Student: **Jan Ziffer**
Studijní program: **B2341 Strojírenství**
Studijní obor: **2301R023 Technická diagnostika, opravy a udržování**
Specializace: **70 Technická diagnostika, opravy a udržování**
Téma: **Analýza technických parametrů a technická diagnostika pecí pro tlakové lití**
Analysis of Technical Parameters and Technical Diagnosis of Furnaces for Pressure Casting

Zásady pro vypracování:

V bakalářské práci rozeberte specifické parametry současných pecí pro tlakové lití přítomných v prostorách firmy Siemens Elektromotory. Zabývejte se také možnostmi diagnostiky těchto pecí se zaměřením na termodiagnostiku, případně navrhněte možnou výměnu stávajících pecí za nové pece pro tlakové lití.

V rámci zadání zpracujte:

1. Rešerši a analýzu dané problematiky.
2. Ideově technický návrh řešení dané problematiky.
3. Zpracujte aplikaci na daný objekt.
4. Proveďte konkrétní vyhodnocení.

Seznam doporučené odborné literatury:

HELEBRANT, F. – MONI, V. – BLATA, J.: *Termografie*. Studijní podklady, Ostrava 2010, 69 s.

MILÁČEK, S.: *Měření a vyhodnocování mechanických veličin*. ČVUT v Praze 2001, 231 s., ISBN 80-01-02417-2

JENČÍK, J. – VOLF, J. A KOL.: *Technická měření*. ČVUT v Praze 2003, 212 s., ISBN 80-01-02138-6

LYSENKO, V.: *Detektory pro bezdotykové měření teplot*. BEN – technická literatura, Praha 2005, 1.vydání, 160s., ISBN 80-7300-180-2

ČSN 01 6910 *Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory*. Praha: Český normalizační institut, srpen 1997. 36 s.

ČSN ISO 690 *Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura*. Praha: Český normalizační institut, 1996. 32 s.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

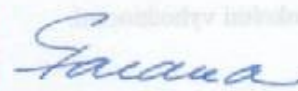
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Blata, Ph.D.**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012



doc. Dr. Ing. Ladislav Kovář
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřisežně prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jana Blaty, Ph.D. a uvedl jsem všechny použité podklady.

V Ostravě: 21.5.2012

Jan Lifer
.....
podpis

Prohlašuji, že

- a) jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- b) беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- c) souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- d) bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- e) bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- f) беру на ве́домі́, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 21.5.2012

Jan Ziffer
.....
podpis

Jméno a příjmení: Jan Ziffer

Adresa trvalého pobytu studenta:

Radkov 37E, 747 83

Anotace

Bakalářská práce se zabývá termodiagnostikou a analýzou pecí pro tlakové lití. V první části práce je rozdělení pecí dle tvaru, paliva a činnosti. V další části je popsáno tavení hliníku a pece vhodné pro tavení hliníku a také pece udržovací. V třetí části je popsána termografie a způsoby měření. Ve čtvrté části je popsáno měření v praxi a vyhodnocení naměřených veličin. V páté části je ekonomické porovnání plynové a elektrické pece. A v poslední části jsou návrhy vhodných alternativ za stávající elektrickou pec, neplnící již nároky podniku.

Abstract

This thesis deals with thermodiagnosics and analysis of furnaces for pressure casting. The first part is the division according to the shape of furnace, fuel and activities. The next section describes aluminum smelting and aluminum smelting furnace suitable for melting aluminum and furnace maintenance. In the third section are described the methods of measurement and thermography. The fourth section describes the measurement and evaluation in practice measured quantities. In the fifth part is an economic comparison of gas and electric ovens. And in the last part of the proposals are suitable alternatives to the existing electric furnace, the company claims has already defaulting.

Úvod.....	10
1 Charakteristiky a typologie metalurgických pecí	11
1.1 Rozdělení pecí dle použitého paliva:	11
1.2 Rozdělení podle tvaru pece a druhu činnosti	14
1.3 Elektrické pece.....	16
1.3.1 Elektrické pece s odporovým záhřevem	18
1.3.2 Indukční pece	19
1.4 Plazmové pece	24
2 Tavení slitin hliníku	29
2.1 Housky slitin	29
2.2 Vratný materiál	30
2.3 Hliníkový šrot	30
2.4 Tavicí a udržovací pece	31
2.4.1 Kelímkové pece	32
2.4.2 Komorové pece	34
2.4.3 Šachtové pece	34
2.4.4 Vanové pece.....	35
2.4.5 Dávkovací pece.....	35
3 Termografie.....	37
3.1 Pasivní termografie	40
3.2 Aktivní termografie.....	41
3.2.1 Teorie tepelné vlny	41
3.2.2 Pulzní termografie.....	42
3.2.3 Lock – in termografie	43
3.2.4 Aktivní pulzní a lock – in ultrazvuková termografie.....	44
3.2.5 Aktivní termografie s využitím kapalných krystalů	44
3.2.6 Vibrotermografie	44
4 Termografické měření pecí	45
4.1 Technické údaje plynové pece BOTTA.....	45
4.2 Technické údaje elektrické pece STRIKO – typ WESTOMAT KBU 60/H	47
4.3 Podmínky při měření	48
4.4 Přístroje potřebné při měření	48
4.5 Termodiagnostika pece Striko	49
4.6 Termodiagnostika pece Botta	51

4.7	Vyhodnocení měření.....	54
5	Ekonomické porovnání elektrické a plynové pece.....	55
6	Návrh nové pece dle parametrů	58
7	Závěr	61

Seznam použitých zkratk a pojmů

Aj.	a jiné
Atd.	a tak dále
Např.	například
Resp.	respektive
Tj.	to je
Tzv.	takzvaný
Bolometr	neselektivní detektor infračerveného záření
CCD	charge - coupled device
Černé těleso	ideální tepelný zářič s emisivitou $\varepsilon = 1$
ELMG	elektromagnetické spektrum
EE	elektrická energie
FFT	frekvenční analýza vibračních signálů
FPA detektor	plošný detektor záření
Fotony	elementární částice elektromagnetického záření
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
IČ	infračervený
IR	infrared
Lock-in termografie	je založena na modulaci řízeného tepelného toku dopadajícího na diagnostikované těleso
LWIR	long wave IR
MWIR	middle wave IR
NWIR	near wave IR
PPT	pulsed phase thermography
SWIR	short wave IR
Šedé těleso	tepelný zářič s konstantní emisivitou a absorpcí
Selektivní zářič	zářič s proměnnou emisivitou
VLWIR	very long wave IR
Termogram	vyhodnocení teplotního pole povrchu objektu
ZP	zemní plyn
α	součinitel pohltivosti (absorpce záření z okolí)

Úvod

Hlavním úkolem nasazení termodiagnostiky je průběžné monitorování technického stavu stroje. Včasnou detekcí závad a jejich odstraněním lze předejít odstávkám pecí v nevhodnou dobu a zajistit bezpečnost provozu. Naplánovat odstávku je třeba ve vhodný časový úsek, kdy touto odstávkou je co nejméně ohrožen chod celé linky a ekonomický dopad nebude příliš velký.

V bakalářské práci se zabývám analýzou a technickou diagnostikou tavicích pecí pro tlakové lití hliníku ve firmě Siemens Elektromotory s.r.o. ve Frenštátě pod Radhoštěm, energetickým porovnáním nákladů na provoz pecí a nalezením vhodné nové pece, dle požadavků podniku a aktuální nabídky trhu.

Pro analýzu pecí byla využita technická bezdemontážní diagnostika a to konkrétně termodiagnostika. Byla diagnostikována problémová místa na pláštích pecí pomocí termokamery Fluke Ti32. Termodiagnostika má v podniku široké uplatnění, mimo kontroly žáruvzdorných vyzdívek pecí lze diagnostikovat vadné kontakty spojů kabelů, ložiska na elektromotorech a jiných točivých strojích. Včasným odhalením závad je eliminován vznik havárie a zabrání se odstávkám strojů na delší čas, než je nezbytně nutný k opravě.

Přáním firmy je nalézt možnou náhradu za již nevyhovující elektrickou pec Striko, která je v provozu už 30 let a nesplňuje jak ekologické, tak ekonomické představy firmy Siemens. V současné době se velké firmy snaží eliminovat své energetické náklady, využívat veškeré možné prostředky pro jejich snížení a již vynaloženou energii co možná nejvíce využít. Ve firmě Siemens jsou např. instalovány do pecí rekuperační zařízení, které využívají teplo ze spalín a tímto teplem je ohřívána voda. Ohřev vody zajistí výměníky v potrubí odtahu spalín. Pro snížení tepelných ztrát přes stěny pecí je zde jako jedna z možností použít termo nátěr Aerotherm, který zajistí snížení tepelných ztrát o cca 3 %. Návratnost této investice je přibližně 4 – 6 měsíců.

Firma Siemens elektromotory má v současné době pro tavení hliníku 4 pece, z toho 3 plynové a 1 elektrickou. Z taveniny se zde vyrábí hliníkové klece rotorových svazků, které vzniknou tlakovým prolitím drážek naskládaného svazku z rotorových plechů taveninou Al čistoty 99,5 % a 99,6 %.

1 Charakteristiky a typologie metalurgických pecí

Pece jsou technologickým zařízením a jejich hlavním úkolem je vytvoření optimálních podmínek pro průběh daného technologického procesu. Síly bránící průběhu reakcí jsou překonávány tepelnou energií. Pro optimální průběh předepsané technologie je důležitý i tvar pracovního prostoru pece. Hospodárnost provozu je poměrně dosti ovlivněná využitím odpadního tepla. [1]

Všeobecně lze rozdělit metalurgické pece na 2 skupiny, a to na zahřívací a tavící pece.

Funkce zahřívacích pecí

- a) Zahřátí materiálu do dosažení úplné změny mechanických vlastností před tlakovým zpracováním tj. válcováním, kováním, lisováním a tažením.
- b) Zahřátí kovu, aby se uskutečnila změna struktury
- c) Zahřátí materiálu za účelem pražení a pálení (např. vápenec, magnetit, žáruvzdorný materiál, ruda...)
- d) Zahřátí materiálu kvůli odstranění vody (sušení) – např. sušení forem ve slévárnách, rudy, pevného paliva aj.

Funkce tavících pecí

- a) Tavení rudy nebo koncentráту a tím oddělení kovu od odpadu
- b) Přetavení kovů
- c) Tavení kovové vsádky, pro získání nového kovu v žádaném složení. Roztavený kov po vypuštění z pece ztuhne, aby v tavících pecích probíhaly procesy dokonale, je nutné věnovat pozornost tvaru, profilu a konstrukci pece.

Dále lze pece dělit dle použitého paliva, tvaru a druhu činnosti.

1.1 Rozdělení pecí dle použitého paliva:

- a) Pece na tuhá paliva
- b) Pece na plynná paliva
- c) Pece na tekutá paliva
- d) Pece pracující s práškovým palivem
- e) Pece šachetní násypné
- f) Pece elektrické

a) Pece na tuhá paliva

Tyto pece dále ještě dělíme podle pracovní teploty na:

Pece s malou provozní teplotou

U těchto pecí spalujeme palivo dokonale přímo v topeništi a zplodiny hoření teprve poté vchází do pracovního prostoru. Zde patří sušící komory, pece s nízkou pracovní teplotou pro ohřev plechů v těžkém strojírenství, zahřívací pece pro lehké kovy.

Pece s vysokou pracovní teplotou v pracovním prostoru

U těchto pecí není v topeništi dosaženo dokonalého spálení paliva, převedením spalín hoření do pracovního prostoru dosáhneme dokonalého spálení, tím získáme maximální teplotu plamene v pracovním prostoru a také potřebný tepelný spád k přenosu tepla na tavený (zahříváný) předmět. Tyto pece najdou využití jako tavící pece s malou výkonností nebo jako zahřívací pece.

Ve slévárenství se používají plamenné tavící pece s rovinným roštem v silné vrstvě paliva, tím dostáváme z větší části nedokonalého spalování. To odpovídá případu poloplynového topení. Topeniště je zde odděleno od pracovního prostoru nízkým jízem, který je nepatrně vyšší než maximální vrstva paliva, nacházející se na roštu. Takto vzniklý pologenerátorový plyn přepadá přes tento jizek do pracovního prostoru, kde se spaluje zvlášť přivedeným sekundárním vzduchem.

U jiných druhů pecí pro nedokonalé spalování paliva se používá stupňovitý rošt, nebo pologenerátorového topeniště.

b) Pece na plynná paliva

V této skupině jsou zahrnuty všechny metalurgické pece. Dle lokální dispozice plynů, se pece vytápí surovým nebo čištěným generátorovým plynem, vysokopecním plynem, koksárenským plynem nebo zemním plynem. V hutích se pracuje se směsným plynem složeného buď z vysokopecního a koksárenského, generátorového a koksárenského nebo se přimíchává k těmto směsím i zemní plyn. Zemní plyn se nejčastěji přimíchává k nízkokalorickým plynům, tj. k vysokopecním a generátorovým. Přimíchávání zemního plynu se neděje centrálně, ale přímo u pracovní jednotky. Někdy se také hlavní plyn předehtřívá, zemní ovšem ne. Pracujeme-li s nižšími teplotami v pracovním prostoru, můžeme použít samostatného vysokopecního plynu a to buď studeného nebo předehtřátého. Předehtřátý vysokopecní plyn nachází uplatnění pro vytápění hlubinných pecí, které pracují na horkou vsádku. Pro studené ingoty u hlubinných pecí se používá směsný plyn o výhřevnosti 1500 – 1800 Kcal/Nm³ nebo pouze samostatný koksárenský plyn.

c) Pece na tekutá paliva

Používají se tam, kde spotřeba paliva není příliš velká, pracovní jednotky malé a kde není k dispozici plyn jiný. Provoz takovýchto pecí je relativně čistý, není zde potřeba transportu paliva a popele. Uplatnění najdou především v provozech, kde pracovní zatížení je krátkodobé. Větší náklady za tekuté palivo, je vyváženo úsporou dopravy uhlí, popele a pracovníka obsluhující pec. Tekuté palivo je i lépe využito. Tyto pece se používají ve slévárnách nebo pro zatápění kotle, pracujícího na práškové topení.

d) Pece pracující s práškovým palivem

Tyto pece jsou dnes již téměř historií. Byly to zejména valčírenské zahřívací pece, tavící nístějové pece a tavící ocelářenské pece. Při tavících procesech se pracuje se struskou, do určité míry nám obsah popele v palivu nevadí, je-li ovšem mez překročena, výhřevnost paliva dosti klesá. U zahřívacích pecí, kde zplodiny hoření vcházejí přímo do styku s pevnou vsádkou, která se jen ohřívá, je potřeba pracovní prostor prodloužit o délku spalovacího prostoru s určitým sklonem, aby se popel v této části usazoval a předešlo se nalepování na povrch zahřívajícího materiálu. U paliva s nízkým obsahem popele nenastává toto nebezpečí a pracovní prostor se prodlužovat nemusí.

e) Pece šachetní násypné

Šachetní pece lze rozdělit dále na: - šachetní pece násypné, jsou vytápěny pevným palivem, které se střídavě s materiálem nasypává do pece

- šachetní pece vytápěné plynem

U násypných pecí palivo klesá shora dolů a postupně přechází do vyšších teplot, kde se vznítí a dojde k dokonalému prohoření. Vzniklé zplodiny hoření stoupají z pásma nejvyšších teplot směrem vzhůru, kde se v kontaktu s rozžhaveným palivem redukují a v dalších pásmech kysličníky kovů opět oxidují. Při stoupání předávají zplodiny své teplo dolů klesajícímu materiálu a to především konvekcí a částečně i sáláním. Maximální přenos tepla sáláním se uskuteční v pásmu nejvyšších teplot a za přítomnosti maximálního množství CO₂.

f) Pece elektrické

Elektrické pece najdou uplatnění hlavně v kovohutnictví pro ohřev materiálu a také jako malé tavící pece. V ocelářství především pro tavení ocele. Elektrické pece jsou obloukové, odporové a indukční. Přenos tepla se děje hlavně sáláním a v samotném

materiálu vedením.

Elektrické pece budou podrobněji rozebrány v kapitole 1.3.

1.2 Rozdělení podle tvaru pece a druhu činnosti

- a) Šachetní pece**
- b) Rotační – rourové pece**
- c) Nístějové, tavící a rafinační pece**
- d) Zahřívací pece**
- e) Pece pro tepelné zpracování**
- f) Tunelové pece**
- g) Komorové pece**

Podle průběhu záhřevu pece lze rozdělit na pece pracující nepřetržitě a pece pracující periodicky.

a) Šachetní pec – olovářská

V peci se za přítomnosti přísad a pevného paliva taví praženec olovnaté rudy. V této násypné peci klesají palivo a ruda shora dolů, do vyšších teplot. Vzduch potřebný ke spálení koksu je přiváděn ze spodní části pece, těsně nad nístějí. Vzniklé zplodiny hoření stoupající nahoru šachtou pece, působí svým složením a teplotou na rudu, kterou roztaví a kov oddělí.

Menší pece ($d = 0,75 - 2,25 \text{ m}$) jsou kruhového průřezu, větší pece (šířky $1 - 1,5 \text{ m}$ a délku od 1 do 9 m) jsou průřezu obdélníkového. Uvnitř obdélníkové pece je šachta, ta je vyzděna žáruvzdorným materiálem, dále přechází v sedlo zúžené směrem dolů, které je vyrobeno z litých nebo ocelových rámů chlazené vodou a v rovině výfučen má obdélníkový tvar. Pod sedlem je nístěj, která je také vyzděná a je spolu s celou šachtou vyztužena pásy. Teplo ze sedla je odváděno chladicí vodou, ta odvede $6 - 8 \%$ tepla přivedeného koksem.

Vzduch přiváděný od dmýchadel je vháněn přes okružní potrubí do pece přes výfučny, ty jsou umístěny v podélných bočních stěnách pece a jejich počet bývá až 24.

Teplota v rovině výfučen je kolem $1600 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Odcházející kychtové plyny jsou velmi jedovaté, aby neunikaly do okolí, je zde pohyblivý poklop, který je připojen na exhaustor.

b) Rotační pece

Jednoduchá konstrukce je tvořena dlouhou ležatou rourou, uvnitř vyzděnou žáruvzdorným materiálem, mírně skloněná a otáčí se. Jedním koncem vstupuje materiál a stálým otáčením a mírným sklonem postupuje k druhému konci, do pásem vyšších teplot. Palivo je do pece přiváděno v místě, kde materiál je již zpracován a odchází z pece.

Jako palivo pro tyto pece se používá práškové uhlí, koks, vysokopeční nebo koksárenský plyn. Maximální teploty aglomeračních pecí je dosaženo ve spékavé zóně. Aby se materiál dokonale spekl, je rotační pec ve spékací rovině rozšířena a to nám zajistí menší rychlost pohybu.

Rotační pece najdou uplatnění při aglomeraci prachových rud, při přímé redukci chudých železných rud, při magnetickém pražení chudých železných rud, při pálení žáruvzdorných materiálu a při sušení paliv a surovin. V metalurgii lehkých kovů se používají k sušení a zkyprění hlinitých rud, ke spékání boritových rud a ke kalcinaci.

Rotační pec pro aglomeraci hliníkových rud

Hlavní částí je roura 50 – 100 m dlouhá, 2 – 3,8 m v průměru. Je vyzděna šamotem a na několika místech po obvodu jsou bandáže s dvěma nosnými kladkami. Sklon 4 – 6 % své délky zajišťuje posuv materiálu uvnitř pracovního prostoru. 1 otáčka trvá asi minutu. Sádka o vlhkosti 40 – 42 % vstupuje do pece na studeném konci a postupuje k horkému konci, přičemž dochází ke styku s procházejícími horkými zplodinami hoření. Aglomerát z pece jde do chladicího bubnu, který se nachází pod rotační pecí. Chladicí buben je obdoba rotační pece, avšak menší délky (30 m) a menšího průměru (2,5 m). Aglomerát je chlazen vzduchem, který je pak použit, jako vzduch ke spálení paliva. Na horkém konci pece je prostor tzv. hlava hořáku, na studeném konci pece je podávání surového materiálu a prostor pro odpad zplodin hoření o teplotě 400 – 500 °C. Zplodiny hoření jsou vháněny do oddělovače prachu a to buď mechanického nebo elektrického.

c) Tavicí a rafinační nístějové pece

Uplatnění najdou tam, kde je třeba tavit železo o žádaném složení, kde je třeba měnit pecní teplotu i atmosféru a kde surové železo je třeba zpracovat na ocel.

Pece používané pro tavení litiny ve slévárnách jsou plamenné pece. Pro výrobu oceli je třeba martinských a pudlovacích pecí, vyrábějící ocel ze surového železa a železného šrotu rafinační cestou. K vytápění se používá uhlí, práškové topení, plynné nebo tekuté palivo, na rozdíl od šachetních pecí, kde se k vytápění používá jen koks.

Plamenné pece pro tavení hliníku

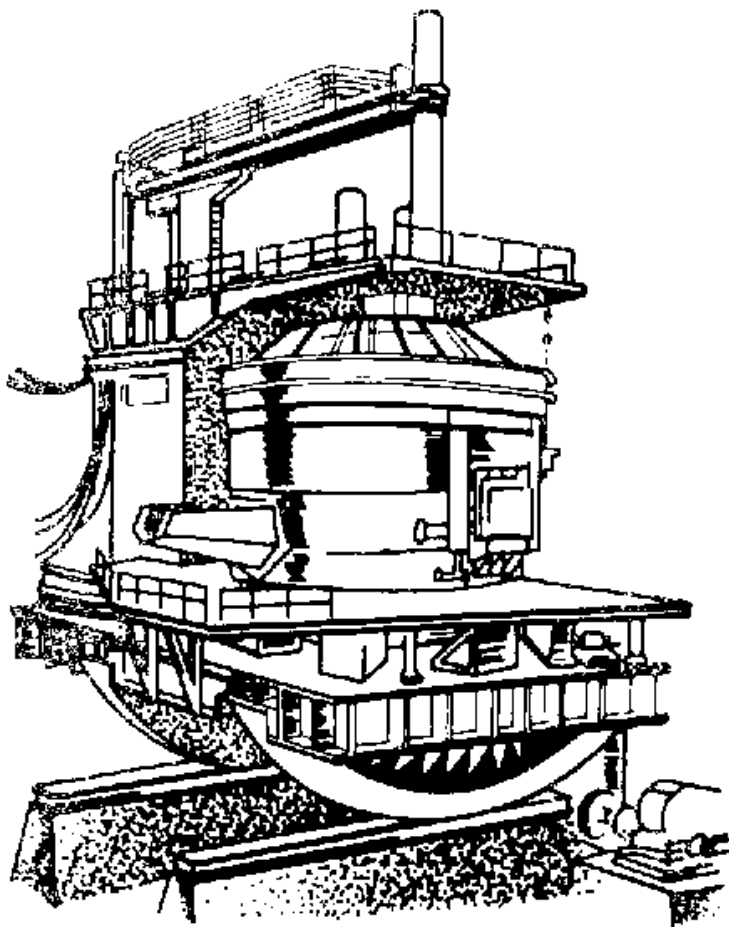
Tyto pece najdou uplatnění při tavení elektrolyticky získaného hliníku. Při vytápění pevným palivem by došlo ke znečištění kovu, proto se používá tekuté palivo, hořlavý plyn a nebo vytápění elektrickým proudem.

Basické vyzdění snižuje opotřebení a protavení vyzdívky $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ a Si by proniknul do lázně. Pracujeme-li nepřetržitě, pak se lázeň při odpichu nevylije úplně. Nová vsádka se přidá ke zbytku roztaveného hliníku.

1.3 Elektrické pece

Podle technologického postupu je lze rozdělit: pece pro výrobu surového kovu z rud, pece tavící a rafinační, pece zahřívací a pro termické zpracování a sušící pece.

Elektrická energie se mění v tepelnou. Elektrický záhřev je buď odporový nebo elektrickým obloukem.



Obr. 1.1 Elektrická pec - oblouková [1]

Nepřímý obloukový záhřev

Oblouk se zde vytvoří mezi dvěma konci elektrod a teplo je přenášeno pouze sáláním na předmět nebo lázeň. Využití najdou při tavení neželezných kovů. Výhodou sálavých pecí je stejnoměrné zatížení, snadno regulovatelné elektrody a při natavování pevného materiálu je vzdálenost od materiálu snadno regulovatelná.

Obloukové odporové pece najdou uplatnění při výrobě feroslitin, karbidu a korundu. Elektrody jsou zde ponořené do materiálu, pod elektrodami se vytvoří tavící a reakční pásmo, díky nim si proud najde cestu k druhé elektrodě, umístěnou v půdě peci.

Ocelářenské elektrické pece

Kvalita vyrobené ocele z elektrických pecí je výborná. Tyto pece se používají také k tavení feromanganu a k výrobě syntetického surového železa. Pro výrobu ocelolitin jsou vhodné elektrické obloukové pece s nepřímým záhřevem pro malé výrobní kapacity. Teplota v peci se pohybuje kolem 1800 °C.

Nejširší využití mají v ocelářství obloukové Héroultovy pece s přímým záhřevem. Tyto pece jsou pro 0,3 – 30 tun vsádky. Spotřeba elektrického proudu u obloukových pecí záleží na technologickém postupu práce, na složení vsádky a jakosti výrobku.

Elektrické pece používané v kovohutnictví

I v kovohutnictví existuje celá řada pecí, většinou pece, které zde již byly uvedeny. Při návrhu pece je nutno zvážit všechny lokální podmínky, jaká pec by byla nejvhodnější pro daný výrobek co se jakosti výroby týče.

Výhody pořízení elektrické pece ve srovnání s pecemi vytápěnými palivem:

- 1) Dosažení vyšších teplot
- 2) Snadná regulace teploty danou výrobním postupem
- 3) Vhodné podmínky pro automatizaci pece
- 4) Velmi dobré využití tlaku k regulaci metalurgického procesu (tavba ve vakuu, termické zpracování pod tlakem)
- 5) Snadno dosáhneme potřebné atmosféry a tím snížíme propal kovu
- 6) Nejsou zde zplodiny hoření, které nám při topení palivy odebírají teplo a tudíž je dosaženo vyšší tepelné účinnosti pece

Nevýhody elektrických pecí v porovnání s plamennými:

- 1) Vysoká pořizovací cena
- 2) Vysoké provozní náklady
- 3) Jednotka dodaného tepla u elektrických pecí je dražší než u pecí, kde je topení prováděno pomocí paliv.

1.3.1 Elektrické pece s odporovým záhřevem

Nepřímý elektrický záhřev je málo používán. Odpořem vznikne pohyb částeczek lázně a tím dojde k záhřevu.

Přímého odporového záhřevu je používáno u malých tavicích pecí, nístějových pecí a solných lázní. Teplo se vyvíjí odporovým vodičem a na zahříváný objekt je přenášen sáláním, konvekcí nebo vedením. Kelímek je obklopen kryptolovou nebo elektrodovou drtí, tou je veden proud. Zahřívací odporové těleso je odděleno vzduchovou vrstvou, odporový záhřev může být uspořádan tak, že odpor se nachází buď nad lázní a nebo v půdě pece je zapěchována elektrodová drť. Další možné uspořádaní je takové, že topné odporové těleso obklopuje materiál, který je zahříván. Pece s tímto uspořádaním mohou být až do 500 V připojené přímo na síť, při vyšším napětí je potřeba transformátor. Výhodou těchto pecí je jednoduchá obsluha, malý propal, stejnoměrný záhřev a přesná regulace teploty.

Konstrukční rozdělení elektrických pecí

Elektrická pec s vertikálním uložením odporového vinutí

Odpory nejčastěji bývají uloženy v drážkách žáruvzdorného zdiva. Tyto drážky bývají otevřeny, nehrozí-li nebezpečí přímého doteku se zahříváním předmětem. Jsou zde koncové izolátory, které jsou zhotoveny z kvalitních šamotů nebo speciálních žáruvzdorných hmot.

Elektrická tavicí pec zahřívána nekovovými zahřívacími elementy

Tyto pece jsou pevné nebo sklopné a používají se pro tavicí teploty nad 1000 °C. Tavicí pec má 3 uhlíkové elektrody procházející v určité výši nad tavicím materiálem, pracovním prostorem tavicí pece a ústí do otvorů stěn. Elektrody jsou na koncích drženy kovovými elektrodovými držadly, ty vybíhají vně pece a jsou připojeny k proudu.

Vsádka se šaržuje dvířky a tavba se vylévá hubicovým otvorem. Tento typ pece lze použít pro tavbu ocele, niklu a ostatních barevných kovů a slitin, které vyžadují teplotu tavení 1400 – 1600 °C.

Díky její jednoduché konstrukci nalezne široké upotřebení. Nevýhodou je především to, že elektrody nelze měnit během pracovního cyklu.

Tavící pec s kovovými otvory

Konstrukce je pravoúhlého tvaru se žáruvzdornou a izolační vyzdívkou. Pec má 2 prostory: - tavící prostor, ve kterém probíhá tavení kovu

- nístěj – do nístěje stéká roztavený kov z tavícího prostoru

Pec má 2 otvory z nichž jeden je šaržovací a druhý je pro odstraňování roztaveného kovu.

Zahřívací pece s kovovými zahřívacími odpory

- 1) Zahřívací pece s periodickým a nepřetržitým provozem
- 2) a) Pece pro vysoký záhřev se sálavým přenosem tepla
b) Pece pro střední záhřev, kde je přenos tepla uskutečněn sáláním a konvekcí nebo jen konvekcí
c) Pece pro nízký záhřev s přenosem tepla pouze konvekcí
- 3) Pece s nucenou nebo přirozenou cirkulací proudění plynu
- 4) Pece s prostředím, které je tvořeno vzduchem, ochranným plynem, vakuem

1.3.2 Indukční pece

Pece s tímto záhřevem se používají hlavně u tavicích pecí pro dosažení vysokých teplot. Podobně jako u transformátoru je zde primární a sekundární proudokruh, kde sekundární okruh je vyvolán v tavné lázni.

Nízko frekvenční indukční pece mají uzavřené železné jádro. Jejich frekvence je 50 Hz a používají se k tavení měděných slitin.

Vysoko frekvenční pece pracují bez uzavřeného železného jádra o frekvenci 500 – 2000 Hz. Jejich princip je založen na elektrickém vodiči ve střídavém poli, ten vytvoří ve vodiči vibrační proudy, které způsobí záhřev. Střídavý proud (primární) prochází kelímkem v cívce. Sekundární proudy jsou vyvolány v materiálu lázně. Stejnomořné promísení lázně zajistí v lázni elektrochemický pohyb. U rafinačních pecí všechny malé

části lázně přejdou do úzkého styku se struskou a tím je rafinace rychlejší a dokonalejší. Zahřívají-li se v těchto pecích nevodivé předměty je potřeba použít vodivý kelímek, jinak se teplo nevyvine.

Indukční pece najdou uplatnění při tavení vzácných ocelí a při tavení niklové slitiny. Jouleovo teplo vyvinuté v cívce musí být chlazeno vodou nebo vzduchem. Výhodou je stejnoměrné zatížení sítě, neznečistění kovu v lázni, nevznikají odpady z elektrod a omezení lokálního přehřátí.

Pro tavení rud se používají elektrické šachetní pece nebo nístějové. Lokální teplota v nístěji je o mnohem větší než v běžné vysoké peci, tím ale trpí klenba nístěje. Aby se tomu zabránilo, je potřeba část vyčištěného vysokopecního plynu přivádět zpět do nístěje, čímž se teplota vyrovná a dokonce i sníží pod teplotu, které je dosaženo u koksových vysokých pecí. Výroba vysokopecního plynu je asi $2400 \text{ m}^3 / 1 \text{ t}$ surového železa. Z toho třetina plynu je nově vzniklá a dvě třetiny množství je zpět vrácený čištěný plyn.

Přímý záhřev v indukčních pecích, je nejefektivnější záhřev kovu elektrickou energií, který poskytne rychlý záhřev a vysokou účinnost. [2]

Princip práce spočívá v přeměně elektromagnetické energie v energii tepelnou. Při dopadu elektromagnetického vlnění na vodivou stěnu se určité množství vlnění odrazí a určité množství pronikne do materiálu, kde vyvolá vířivé proudy. Volné elektrony v kovu jsou urychlovány, předávají svou energii atomům vodiče, frekvence kmitání atomů roste a taktéž i teplota zahřívaného materiálu.

1) Indukční pece se železným jádrem (kanálkové)

Nejčastěji se zde vyskytují pece se zakrytým horizontálním kanálkem. Válcový induktor, tvořený závitů vodou chlazené měděné trubky, je na jádro z transformátorových plechů nasazen. Kolem induktoru je uzavřený, žáruvzdorný kanálek, naplněný tekutým kovem. Kanálek vytvoří jediný závit sekundárního vinutí transformátoru. Pec pracuje tehdy, vytvoří-li se elektricky uzavřená vodivá smyčka, kanálek tedy musí být neustále naplněn roztaveným kovem. Tavbu nelze začít s pevnou vsázkou. Tavenina se předem připraví v jiném zařízení, nebo se v peci ponechá část z předchozí tavby. Je to 10 – 30 % kapacity pece.

Prakticky celá přeměna elektromagnetické energie v energii tepelnou se uskuteční v kanálku. Teplo se šíří konvekcí a vedením. Pece mají vysoký koeficient účinnosti, až 95%. Celková účinnost je mezi 70 – 80 %, přičemž horní hranice platí pro větší pece.

Vysoké teploty a intenzivní proudění taveniny v kanálku značně snižují jeho životnost. Kvalitní keramické žáruvzdorné materiály umožní prodloužit trvanlivost vyzdívky a taky vzroste měrný příkon pecí.

Pracují obvykle spolu s jiným tavící agregátem v tzv. duplex procesu. To mohou být například dvojice kuplovna – indukční kanálková pec, což je nejrozšířenější proces, kde indukční pec stabilizuje chemické složení litiny a umožní přesné zvýšení teploty roztaveného kovu na požadovanou hodnotu. Dále to mohou být dvojice vysoká pec – indukční kanálková pec, indukční kelímková pec – indukční kanálková pec aj.

Velké indukční kanálkové pece mají tvar horizontálního válce a kanálky jsou vertikální nebo šikmé. Kapacita takových pecí dosahuje ve slévárnách litiny až 270 t.

Kanálkové tavící pece pro litinu se vyzdívají materiály s vysokým obsahem korundu. Vyzdívka vlastní pece je na rozdíl od kelímkových pecí dost silná, tím se snižují tepelné ztráty, zlepšují pracovní podmínky v provozu a v případě výpadku dodávky elektrické energie zůstane kov ještě několik hodin v tekutém stavu. Vyzdívku kanálku kolem induktoru je potřeba mít co nejtenčí, aby se nesnižovala účinnost pece. Jsou-li kanálky konstruovány jako odnímací, pak při jejich výměně nedojde k poškození zbývajících vyzdívky. U horizontálních typů pecí s více kanálky lze indukční jednotku vyměnit během provozu.

2) Indukční pece bez železného jádra

Indukční pece bez železného jádra jsou známy spíše pod názvem kelímkové pece. Kelímk ze žáruvzdorného keramického materiálu je umístěn uvnitř induktoru, který je válcového tvaru. Díky chybějícímu železnému jádru se většina siločar uzavírá vzduchem, energetické ztráty jsou dost vysoké a tím se snižuje účinnost pece.

V plných vodičích, kterými prochází střídavý proud, vzniká velmi důležitý povrchový jev tzv. skinefekt. Plošná hustota střídavého proudu není v celém průřezu vodiče stejná, v ose může klesat až k nule. Na povrchu je hustota největší. Příčinou jsou indukované vířivé proudy, které mají v ose vodiče opačný smysl a na jeho povrchu smysl souhlasný s okamžitým směrem střídavého proudu. V praxi to znamená zvýšení elektrického odporu, neboť zdánlivě klesá průřezová plocha průchodu proudu.

Se zvětšujícím se kmitočtem roste proudová hustota v povrchových vrstvách vodiče a její rozdělení se stává nerovnoměrnějším. Pojem hloubka vniku je pomyslná vzdálenost od povrchu vodiče, v níž se fáze magnetického vlnění mění o 2π .

K vytvoření střídavého magnetického pole slouží induktor, který zároveň zajišťuje konstrukční stabilitu kelímkové pece během jejího sklápění. Induktor je většinou navinut z měděné trubky obdélníkového průřezu. Ve válcovém induktoru teče většina proudu jeho vnitřními vrstvami, proto je aktivní pouze vnitřní stěna trubky. Ostatní stěny mohou být slabší, pokud to neovlivní příliš mechanickou pevnost.

Jednotlivé, mezi sebou odizolované závitky induktoru, jsou na kelímek navinuty ve šroubovici s malým stoupáním nebo leží kolmo na osu kelímku a spojují je krátké šikmé přechody. Celkový počet závitů bývá až 60. V důsledku vysoké hustoty proudu je induktor intenzivně ohříván a je nutné chlazení vodou. Voda odvádí i teplo procházející žáruvzdornou vyzdívku kelímku, které induktor také ohřívá. Teplota vody se pohybuje mezi $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $45\text{ }^{\circ}\text{C}$, což je zhruba i teplota stěny cívky. Je-li voda příliš chladná, teplota induktoru pak klesne pod teplotu okolí. Na cívce se začne kondenzovat vzdušná vlhkost a může dojít ke zkratům mezi závitky.

Elektrická účinnost indukční kelímkové pece klesá se zvětšující se šířkou mezerou mezi induktorem a vsázkou. Vyzdívka kelímkových pecí nepřesahuje 0,25 m. Kelímky menších pecí se vytvářejí buď formováním mimo pec ve speciálních formách nebo lisováním.

U kelímkových pecí se používají kyselé, zásadité i neutrální žáruvzdorné materiály. Kyselé vyzdívka obsahuje asi 95 % SiO_2 a dosahuje slušné trvanlivosti. Zásaditá vyzdívka se vyrábí z magnezitových materiálů a s přísadou kysličníku chromitého a je zpracována tak, aby byla objemově co nestálější. Životnost zásaditých kelímků je kratší než u kyselých a značně kolísá v závislosti na jakosti vyráběné oceli, technologii výroby, na velikosti pece apod. Zásadním nedostatkem zásaditých vyzdívek je tvorba trhlin. Neutrální vyzdívka je reprezentována materiály na bázi Al_2O_3 , Cr_2O_3 . Trvanlivost je srovnatelná s kyselou vyzdívku a mnohdy i vyšší. Neutrální vyzdívka umožňuje tavit žáruvzdorné slitiny a kovy s vysokým bodem tání.

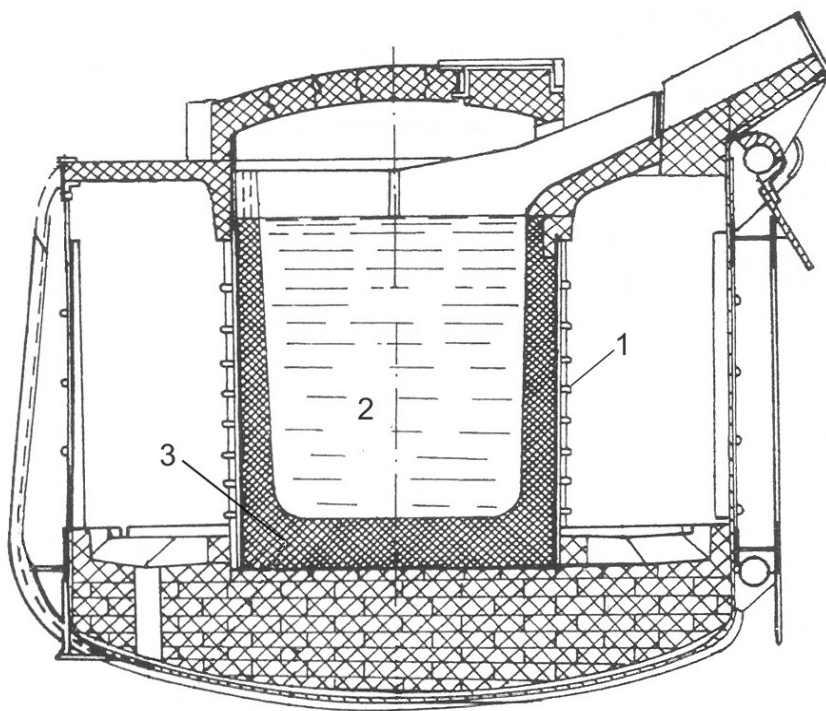
Pro zmenšení tepelných ztrát do okolí jsou kelímkové pece opatřeny otočným víkem, vyzdřeným žáruvzdorným materiálem. Sklápění pecí se provádí elektromechanicky nebo pomocí hydraulických válců. Velké pece mají oboustranné sklápění, při naklonění na jednu stranu se stahuje struska, při naklonění na druhou se vylévá roztavený materiál.

Výhody indukčních kelímkových pecí v porovnání s obloukovými:

- tavení v libovolné atmosféře umožňuje výrobu široké škály ocelí od nízkouhlíkových až po vysokolegované
- minimální ztráty legur
- chemická homogenita a rovnoměrná teplota v tavenině
- tavení probíhá bez potřeby elektrod
- možná automatizace procesu při současné přesné regulaci teploty taveniny
- bezhlučný provoz s minimálními emisemi plynů

Nevýhody indukčních kelímkových pecí v porovnání s obloukovými:

- struska je ohřívána od kovu a má proto o 100 až 200 K nižší teplotu než tavenina
- krátká životnost vyzdívky
- vyšší pořizovací náklady
- indukční pece mají menší výrobnost



Obr 1. 2 Indukční kelímková pec

1 – měděný induktor, 2 – tavený kov, 3 – kelímek [6]

1.4 Plazmové pece

Při normálních podmínkách nemá plyn elektrickou vodivost. Vlivem vnějších faktorů, jako např. elektrický výboj, teplo, radioaktivní záření, elektromagnetické záření vzniká v plynu částice s elektrickým nábojem. Směs elektronů a iontů, která může být uvnitř plynu z neutrálních částic, nazýváme **plazmou**. Množství kladných a záporných částic je v takové míře, že celkový náboj je v rovnovážném stavu roven nule, ionizovaný plyn je navenek neutrální. Na rozdíl od plynů je plazma elektricky vodivá a má velkou kapacitu a vodivost. Také na ni působí účinky elektrického a magnetického pole.

- nízkoteplotní plazma s teplotou 1000 až 10000 K
- vysokoteplotní plazma s teplotou 10 000 až 10^8 K

Plazmové metalurgie využívá nízkoteplotní plazmy zhruba v rozmezí teplot 2000 – 20 000 K a tlaků 10^{-2} – 10^6 Pa.

Zařízení pro přeměnu elektrické energie v tepelnou energii nízkoteplotní plazmy se nazývá *plazmatron*. Podstatou ionizace ve výboji je vznik tzv. elektronových lavin, který má charakter řetězové reakce. Plazmatrony s plynovou stabilizací elektrického oblouku pracují se stejnosměrným proudem s vysokou intenzitou nebo také se střídavým proudem. Obloukový plazmový hořák má poměrně vysokou účinnost a dosahuje vysoké koncentrace tepelné energie.

Plazmotvorný plyn může být jednosložkový – argon, dusík, helium, vodík nebo vícesložkový, který vznikne kombinací těchto plynů – argon + vodík, argon + helium, argon + dusík, vzduch + zemní plyn. Jednosložkový či vícesložkový plyn se vybírá podle technologie, zda vyžaduje oxidační, redukční nebo neutrální atmosféru.

Tab. 1. Charakteristiky plazmotvorných plynů při teplotě $T = 10\,000$ K a $p = 101$ kPa [1]

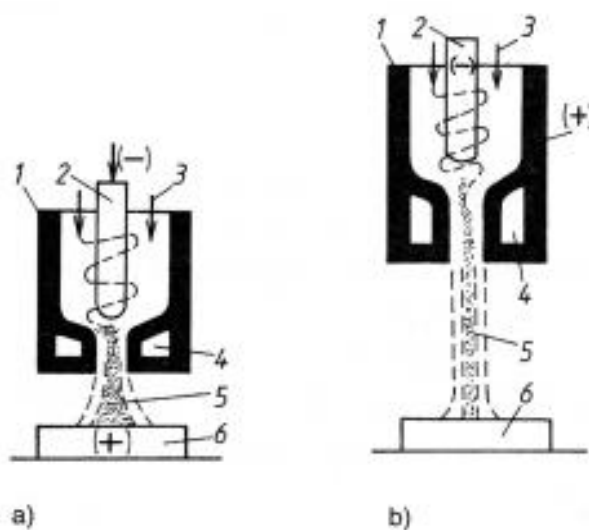
Plyn	Ar	N ₂	H ₂	He
Tepelná vodivost λ [W . m ⁻¹ . K ⁻¹]	0,42	2,63	3,45	2,29
Měrná el. vodivost γ [S . m ⁻¹]	3650	2740	1400	6300
Entalpie plazmy H [MJ . kg ⁻¹]	6,15	50,3	460,9	49,9

Argon nemá příliš dobré energetické vlastnosti – vysokou měrnou elektrickou vodivost, nízkou tepelnou vodivost a malé měrné teplo viz. tab. 1. Entalpie argonové plazmy je příliš malá a teplo se špatně předává ohřívanému kovu. I přes velké nedostatky se argon v metalurgii užívá nejčastěji, neboť po rozpadu plazmy tvoří inertní atmosféru. Nedostatky argonu jako plazmotvorného plynu jsou kompenzovány zvýšením foukaného množství do hořáku.

Velmi často se používá v technice plazmatu dusík. Entalpie dusíkové plazmy je vysoká, tento plyn je snadno získatelný a ve srovnání s ostatními plyny je levnější. Zásadní nevýhodou ovšem je, že napadá a rozrušuje elektrody plazmatronu.

Helium ve srovnání s argonem má lepší vlastnosti avšak cena je dosti vysoká. Z energetického hlediska je nejlepším a nejvýhodnějším plazmotvorným plynem vodík, ovšem působí agresivně na elektrody hořáku. Erozivní působení molekulárních plynů lze eliminovat použitím jejich směsí s inertními plyny.

Existují 2 základní typy plazmatronů s obloukovým výbojem stabilizovaným plynem, a to se závislým a s nezávislým elektrickým obloukem. Těleso hořáku musí být ochlazováno vodou, elektrody jsou obvykle wolframové. Hořáky s nezávislým obloukem umožňují tavit i elektricky nevodivé materiály. V metalurgii se nejvíce využívá plazmových hořáků se závislým obloukem, umožňující dosáhnout vysokých výkonů.



Obr. 1.3 Schéma plazmových hořáků: a) s nezávislým obloukem; b) se závislým obloukem

1 – těleso hořáku, 2 – katoda, 3 – přívod plynu (argon), 4 – chlazení hořáku, 5 – paprsek plazmatu, 6 – tavený materiál [7]

Pro tavení materiálu se používají 2 typy plazmotvorných pecí:

1) Tavicí pec se žáruvzdornou tavící vyzdívkou

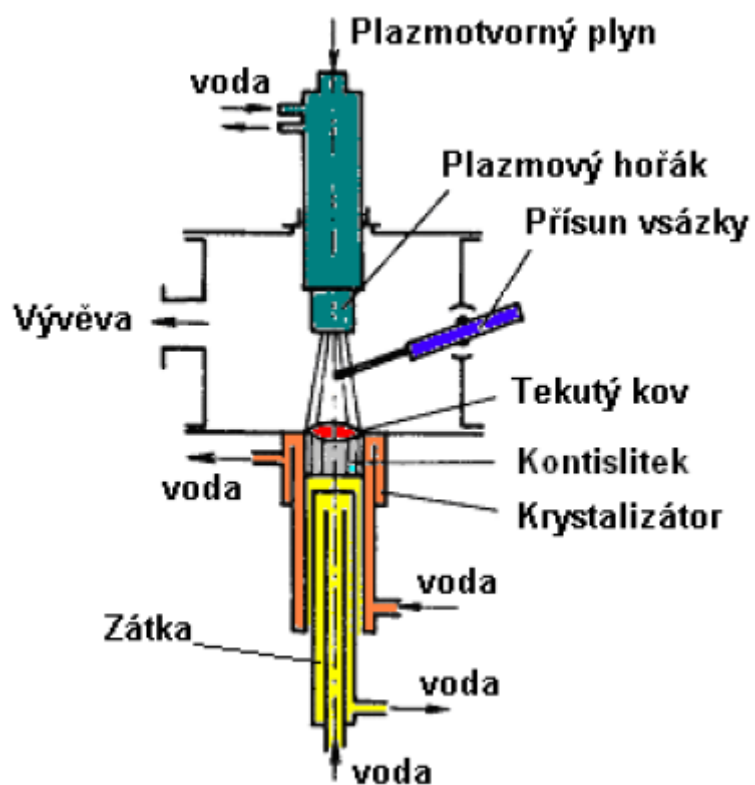
Princip jejich práce je obdobný jako u obloukových, ovšem elektrody jsou nahrazeny plazmovými hořáky. Vodou chlazená katoda plazmatronu ze slitiny na bázi wolframu je před rozstříkem kovu a strusky chráněna měděnou tryskou rovněž ochlazovanou vodou. V níže je chlazená elektroda – anoda, která přivádí proud na vsázku. Prostor v peci je utěsněn labyrintovým pískovým uzávěrem tak, aby umožnil tavení v inertní atmosféře. Tvarem i vyzdívkou pracovního prostoru jsou stejné jako obloukové peci. Pec je vybavena zařízením pro elektromagnetické míchání, aby se předešlo místnímu přehřívání taveniny.

Plazmová tavící pec s hořáky, zabudovanými pod úhlem 45° v bočních stěnách. Pec má menší ztráty tepla odvedeného chladicí vodou a vyšší účinnost. Plazmové peci pracují se střídavým proudem v třífázovém zapojení. Na 3 plazmové hořáky nad lázní se přivádí pomocný stejnosměrný proud pro vytvoření řídicího oblouku anodou a katodou (tryskou) plazmatronu. Každá tryska je připojena na jednu fázi zdroje střídavého proudu, ten prochází od jedné trysky k druhé plamenem plazmy a lázní. Pro provoz peci není potřeba půdní elektrody.

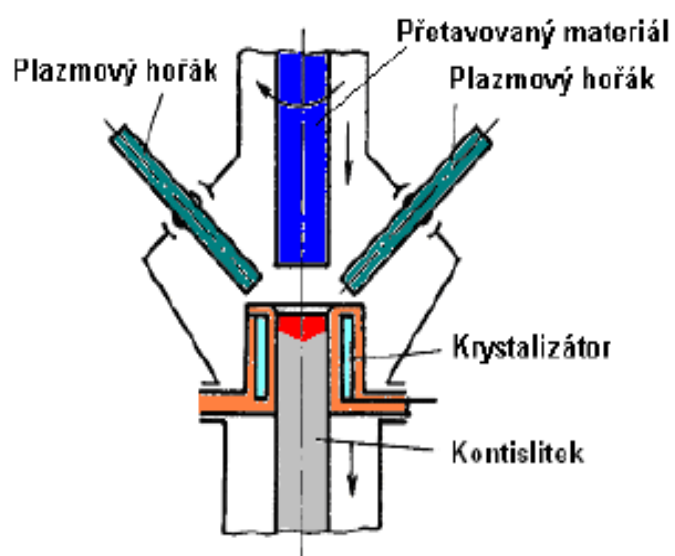
2) Plazmové peci s chlazeným krystalizátorem

Svou koncepcí je podobná pecím elektronovým. Místo elektronových děl se užívají plazmatrony a pracuje se s téměř atmosférickým tlakem. Peci jsou vhodné pro přetavování jakostních ocelí, kovů nebo slitin s vysokou teplotou tavení.

Pec je tvořena vlastní tavící komorou s měděným krystalizátorem a plazmatrony. Nad ní je komora pro přetavovaný materiál, v dolní části prostor pro chladnutí kovu. Přetavovaný kov je podáván mechanismem s osovým a otáčivým pohybem. Pec je také vybavena systémy pro vytvoření předběžného vakua, chlazení krystalizátoru a dalších částí peci, přívodu, čištění, a recirkulace pracovního plynu. Plazmotvorný plyn, respektive podíl argonu ve vícesložkové směsi a tlak v pracovním prostoru se volí podle chemického složení přetavovaných kovů a slitin. Počet hořáků je 4 – 6.



Obr. 1.4 Schéma vertikálního krystalizátoru s jedním plazmovým hořákem [8]



Obr. 1.5 Schéma vertikálního krystalizátoru se dvěma plazmovými hořáky [8]

Přednosti plazmových pecí:

- V plazmové peci lze vytvořit libovolnou atmosféru
- Kov není znečištěn elektrodami
- Velmi dobré podmínky pro odplynění kovu i při atmosférickém tlaku
- Malé množství vypařeného kovu
- Dosahuje vysokých snadno regulovatelných teplot
- Vysoká koncentrace energie, rychlé tavení (součinitel přestupu tepla cca $10^3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)
- Konstrukce je jednodušší než u vakuových pecí

Nedostatky plazmových pecí:

- Hořáky nedosahují příliš dlouhé životnosti
- Při spálení trysky hrozí proniknutí chladicí vody do pece [3]

2 Tavení slitin hliníku

Nelze dosáhnout lepší kvality odlitků, než byla kvalita roztaveného kovu.

Úkolem tavicího procesu tedy musí být natavení slitiny s požadovanou kvalitou a to za co nejnižší náklady. Kvalitní tavenina by měla mít požadované chemické složení s co nejnižším obsahem oxidických a neoxidických vměstků a nízkým naplyněním. O kvalitě kovu rozhodují především tyto faktory:

- suroviny vsázky
- konstrukce a typ tavicích i udržovacích pecí
- způsob metalurgického procesu
- metalurgické zpracování a způsob lití

Volba vsázkových surovin je typickým kompromisem mezi kvalitou a cenou, jinak řečeno by měly být použity takové suroviny, aby zajistily požadovanou kvalitu kovu při co nejnižších nákladech. Náklady ale tvoří i zpracovací náklady, riziko zmetkovitosti a cena oprav.

2.1 Housky slitin

Jsou dodávány z hutí a jsou nejkvalitnějším vsázkovým materiálem. Mají garantované chemické složení, nízký obsah nečistot a rozpuštěných plynů. Rozlišujeme tzv. primární slitiny - slitiny prvního tavení, vyrobené hutnickým způsobem z kovových rud a sekundární slitiny - slitiny druhého tavení, vyrobené hutnickým přetavením hliníkového šrotu. Sekundární slitiny jsou z různých zdrojů a mívají různé složení. Obsahují tedy větší množství přísadových prvků a nečistot, než slitiny primární. Některé z prvků lze metalurgickými postupy alespoň částečně odstranit, některé však odstranit nelze. Slitiny požadovaného chemického složení se z nich připraví pomocí čistých složek a legur. Tyto slitiny se potom rafinují a odlévají do housek.



Obr. 2.1 Hliníkové housky

2.2 Vratný materiál

Jsou to vtoky, nálitky, zmetky a představují významnou část vsázky. Podle technologie odlévání a podle druhu odlitků může být využití tekutého kovu i méně než 50 % a téměř vždy představuje vratný materiál významný podíl z nataveného kovu.

Vratný materiál obsahuje větší množství vměstků, chemických nečistot a rozpuštěných plynů, než bývá v houskách. Z hlediska kvality je důležitá míra znečištění a tvar vratného materiálu. Na povrchu každého kusu je vrstva oxidu, která se prostřednictvím vsázky vnáší do tavení a zhoršuje její čistotu. Kompaktní kusy např. nálitky, vtoky nebo zmetkové odlitky, které mají malý povrch proti objemu, jsou kvalitativně vhodné do vsázky. Oproti tomu tenkostěnné podíly vratného materiálu, zatekliny nebo dokonce broky, vzniklé rozstříkem kovu, mají relativně velký povrch vůči malému objemu a vnáší do tavení velké množství vměstků.

Množství vratného materiálu, které se uplatní do vsázky závisí na požadované kvalitě kovu – čím vyšší jsou nároky na kvalitu, tím méně se vsází vratného materiálu. Požadujeme-li kov nejvyšší kvality, je třeba tavit pouze z housek. Pro méně náročné odlitky je možno tavit ze 100 % vratného materiálu.

2.3 Hliníkový šrot

Z kvalitativního hlediska jde o nejméně vhodné vsázkové suroviny. Hlavní nedostatky pro použití do vsázky:

- nejisté chemické složení
- možné znečištění organickými látkami (mazadla, nátěrové hmoty aj.)
- velké množství oxidických vměstků, chemické znečištění jinými prvky např. v důsledku nedokonalého vytřídění – ložiska, železné nebo měděné součástky

- vnáší do vsázky vodu, která je vázaná jako hydroxid na povrchu nebo kapilárními silami v prasklinách a pórech

Do slitin, kde požadujeme vysokou kvalitu by neměl být hliníkový šrot použit. Pokud je jako vsázkový materiál použit, musí být vytríděný, odmaštěný a suchý. Třísky jsou často znečištěny řeznými kapalinami, vytváří velké množství oxidických vměstků a tudíž by se do vsázky neměli vůbec přidávat.

2.4 Tavicí a udržovací pece

V tavicích pecích se kov ohřeje na přibližně technologickou lící teplotu, provede se úprava chemického složení, rafinace a odplynění.

Udržovací pece slouží zejména k udržování lící teploty taveniny v blízkosti jednotlivých pracovišť nebo lících agregátů. Topný systém zajišťuje regulaci teploty kovu a částečně také tavení pevné vsázky, přidávané do roztaveného kovu. Udržovací pece obvykle nezajišťují zásadní úpravy chemického složení ani větší metalurgické zásahy.

Požadavky na tavicí pece

Obecné zásady pro tavicí a udržovací pece:

- malá oxidace a naplynění kovů
- oddělení tekutého kovu od pevné části vsázky
- zamezení místnímu přehřátí tavení

Rozsah oxidace závisí především na chemickém charakteru atmosféry v peci a velmi významně také na způsobu proudění a turbulenci taveniny. Jakýkoliv pohyb kovů, při kterém dojde k porušení kompaktnosti oxidické vrstvy na hladině, je příčinou další oxidace. Proto je nutné zamezit zbytečnému víření, přelévání a míchání kovů. Toto hledisko nesplňují některé indukční pece (především vanové), u nichž dochází za některých okolností k intenzivnímu míchání taveniny. Následek oxidace je propal. Hodnota propalu je důležitým technicko - ekonomickým parametrem pece.

Oxidy plavající na hladině nebo oxidy vynesené na hladinu při rafinaci se oddělují od tekutého kovu a tvoří tzv. *stěry*. Stěry představují ztrátu kovu, které ve slévárnách nelze přímo zpracovat. Posílají se proto na hutní zpracování nebo pro jiné použití. S mírou oxidace úzce souvisí i míra naplynění.

Naplynění závisí především na kontaktu taveniny s jakoukoliv formou vlhkostí. Vliv na naplynění má i obsah vodní páry v atmosféře pece. U spalovacích pecí je proto vhodné,

aby nedocházelo k přímému styku kovu se spaliny.

Oddělení tekutého kovu od pevné vsázky je požadavkem, který opět souvisí se zamezením přímého styku taveniny s vlhkostí. Tomuto požadavku vyhovují především pece kelímkové, v nichž se taví z pevné vsázky bez dosazování. Pokud je ovšem potřeba během tavby vsázku doplnit, je nutné přidávat dokonalé vysušené, předeřtáé suroviny. Zásadní chybou je, dosazování studených vsázkových surovin do lázně roztaveného kovu. Tento aspekt splňují především šachtové nebo dvoukomorové vanové pece, v nichž je oddělena část předeřtáací a tavící od části, v nichž je shromažďován tekutý kov. Kromě metalurgických výhod přináší předeřtáání vsázky i výrazný ekonomický efekt. Vsázka, předeřtáá na 300 °C zajistí asi 20 % celkového tepla roztaveného kovu.

Místní přehřtáání kovu má negativní vliv na vznik vměstků, naplynění a na stav krystalizačních zárodů. Dochází k němu při nerovnoměrném, jednostranném ohřevu v nevhodně seřizených kelímkových pecích, ale nejvíce v induktorech kanálkových pecí.

Vytápění pecí

Pro tavení hliníkových slitin najdou uplatnění pece plamenné nebo elektrické.

U plamenných pecí je jako palivo používáno téměř výhradně zemního plynu. S výhřevností asi 35 000 kJ / Nm³ se na roztavení a přehřtáání 100 kg hliníku na teplotu 750 °C spotřebuje asi 3,6 Nm³ zemního plynu. Skutečná spotřeba však činí asi 8 - 20 Nm³. Pro dosažení dokonalé tepelné účinnosti a příznivých metalurgických poměrů je důležité správné rozvržení poměru plynu a vzduchu.

Pece pro tavení hliníku

2.4.1 Kelímkové pece

Pro tavení menšího množství kovu jsou obvykle používány pece s jílografitovými kelímkami nebo kelímkami z SiC. Po roztavení kovu jsou kelímkami z pece vyjmuty a slouží pak také jako transportní a lící pánve. Velikost kelímků je obvykle do 200 kg hliníkové slitiny. Při používání kelímků je nutno dodržet tyto základní pravidla:

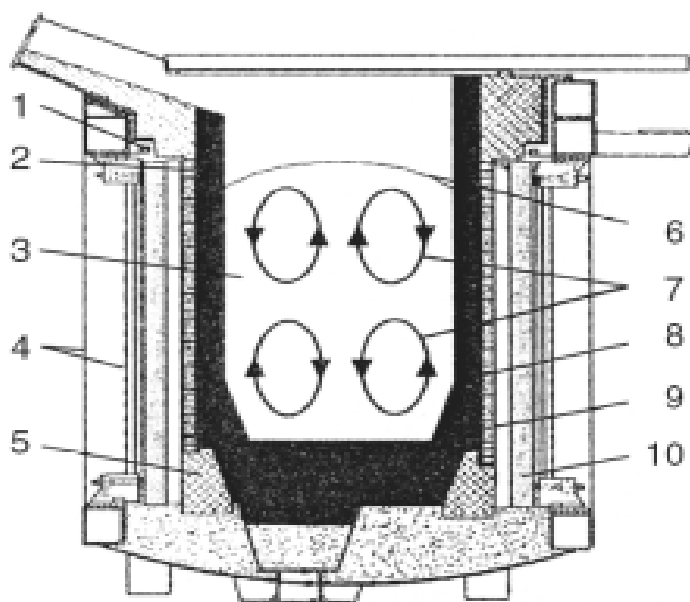
- nový kelímek musí být dokonale vysušen
- ohřev kelímků nesmí být proveden tepelným šokem, rovněž ochlazování prázdného kelímků musí být pozvolné (na klidném vzduchu, nikoliv však v průvanu)
- není vhodné tavit kov, který předtím v kelímku ztuhnul – ztuhlý kov se při

ohřevu roztahuje a může zapříčinit prasknutí kelímků

- kelímek po skončení tavby musí být řádně vyčištěn a uskladněn na suchém místě
- při vkládání vsázky by neměly na kelímek působit prudké rázy
- stav kelímku po každé tavbě kontrolovat, poškozené nebo opotřebené vyměnit
- v plamenných pecích sledovat správné seřízení hořáků

Při dodržení podmínek tavby je životnost kelímků řádově ve stovkách taveb. Kelímkové pece jsou vytápěné plynem nebo elektrickým odporem. Předností elektrického ohřevu je, že se kov nedostává do styku se spaliny, z nichž by mohl pohlcovat vlhkost. Pec je opatřena víkem a u plynových pecí navíc s odtahem spalin. Pro větší tavicí výkony a větší množství taveného kovu se používají sklopné kelímkové pece. Kelímky jsou obvykle vyzděny žáruvzdornou vyzdívkou na bázi Al_2O_3 a SiO_2 .

Schéma kelímkové indukční pece je na obr. 2.2.

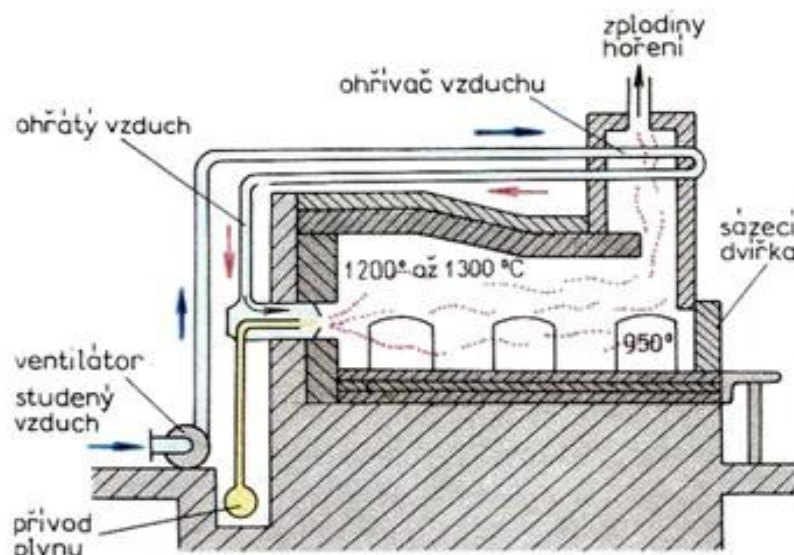


Obr. 2.2 Kelímková indukční pec [9]

1 – kroužek spojený nakrátko 2 – vodou chlazený prstenec 3 – tavenina 4 – ocelová kostra 5 – betonový prstenec 6 – kopulovitá horní hladina 7 – pohyb taveniny 8 – kelímek 9 – induktor 10 – svazek plechů

2.4.2 Komorové pece

Osvědčený a nejrozšířenější typ pecí, které se skládají z tavící a nístějové části viz. obr. 2.3. Vsázka je vsazena do tavící části a nepřichází do přímého kontaktu s taveninou. Na podobném principu pracují i dvoukomorové vanové pece s vertikálním uspořádáním, u nichž se vsázka zaváží do horní tavící komory a tekutý kov odtéká do spodní komory, která představuje zásobník kovu.

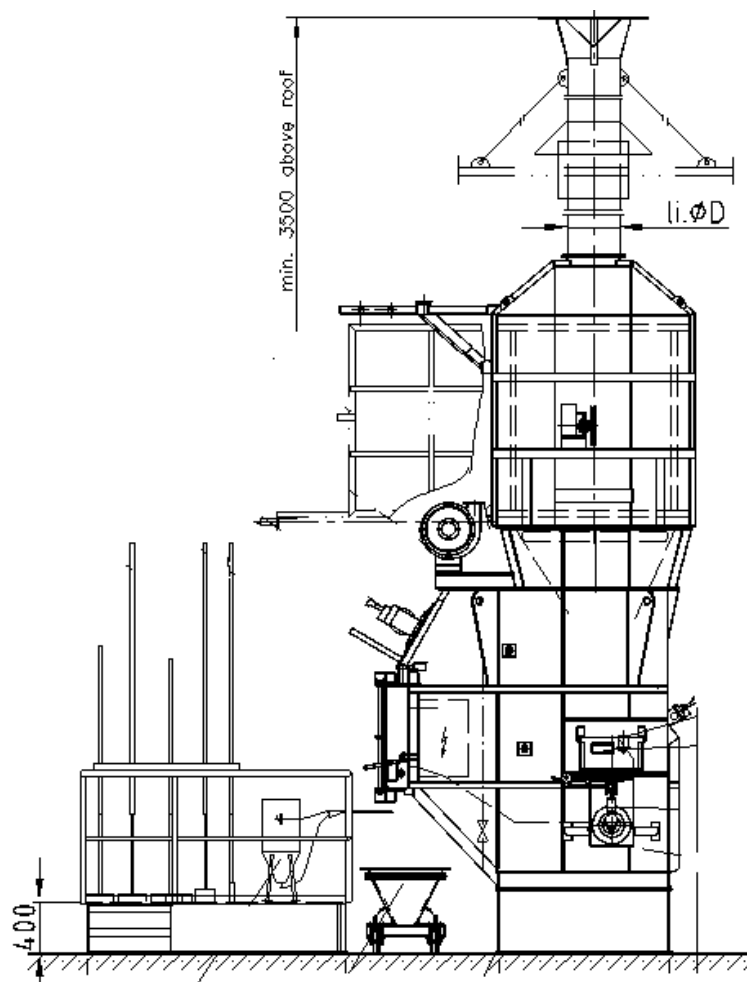


Obr. 2.3 Schéma komorové pece [10]

2.4.3 Šachtové pece

Pracují na principu protiproudého výměníku tepla. U této pece se vsázka dopravuje zavážecím zařízením do šachtice pece. V ní dojde k odpaření vlhkosti a případnému vyhoření organických nečistot. Tavicí zóna se nachází ve spodní části šachtice. Zde je vsázka natavena a roztavený kov odtéká do udržovací komory. Z komory se odebírá buď po jednotlivých licích dávkách z boční vany, spojené s udržovací komorou sifonem, nebo se vylévá po větších dávkách do transportní pánve. Vyhřívání pece zajišťují plynové nebo olejové hořáky. Menším pecím stačí pouze jeden hořák, směřovaný do udržovací komory, u větších pecí je obvyklá konstrukce se 2 samostatně regulovatelnými hořáky, z nichž jeden je v tavicí zóně a druhý hořák je v udržovací komoře. Pec je vyzděna žáruvzdornými materiály a vnější izolační vrstvou, která snižuje tepelné úniky.

Výhodou těchto pecí je, že vsázka se postupně předeřhřívá a vlhké nebo znečištěné vsázkové suroviny se nemohou dostat přímo do roztaveného kovu. Tím se dosáhne dobré čistoty kovu s nízkým stupněm naplynění. Přes boční dvířka je kov v udržovací komoře snadno přístupný a lze pomocí metalurgických solí provádět čištění a rafinaci taveniny.



Obr. 2.3 Šachtová pec [11]

2.4.4 Vanové pece

Pec má tvar vany s malou hloubkou a mohou být jednokomorové až tříkomorové. Obvykle jsou používány jako udržovací pece, tzn. vsázkou je tekutý kov, který se nalévá do plnicí komory. Po otevření pracovních dvířek nebo odklopení víka jsou komory přístupné pro legování, čištění hladiny nebo jiné metalurgické zásahy. Kov se odebírá z odebírací komory, oddělené od hlavní komory sifonem.

2.4.5 Dávkovací pece

Dávkovací pece slouží k automatickému dávkování tekutého kovu, nejčastěji při odlévání do kovových forem pod tlakem. Roztavený kov, natavený v tavící peci, se plnicím trychtýřem nalije do vany dávkovací pece, která je hermeticky uzavřena. Teplota se většinou udržuje pomocí odporových článků SiC nad hladinou kovu. Teplota je měřena pomocí termočlánku a udržuje se v úzkých tolerancích až ± 1 K. V peci je stále udržován mírný přetlak tlakového vzduchu nebo ochranného plynu. Dávkování kovu zajistí zvýšení

tlaku plynu v komoře pece, který vytlačí kov do dávkovací trubice. Po snížení přetlaku na původní hodnotu se vylévání kovu zastaví. Množství nadávkovaného kovu se řídí automaticky podle předem nastaveného údaje velikosti přetlaku a času. Volbou tlakového režimu je možno regulovat i rychlost vytékání kovu. Přesnost dávkování většinou nepřesáhne 0,5 % hmotnosti. [4]



Obr. 2.5 Dávkovací pec [12]

3 Termografie

Termografie se zabývá teplotními poli na povrchu snímaných těles a zobrazením těchto polí, které jsou reprezentovány energií a hustotou fotonů emitovaných z povrchu snímaného tělesa.

Předmětem termovizního měření je tedy snímaný objekt, resp. jeho povrch, emitující fotony – zářivou energii v IČ (dlouhovlnné infračervené pásmo) části ELMG spektra. Povrch si lze představit jako soustavu bodových zdrojů signálové radiace, kde každý bod povrchu vysílá fotony do všech směrů. Tepelné záření je vyjádřeno tokem fotonů a jeho velikost je závislá především na teplotě snímaného objektu. S rostoucí teplotou roste také celková intenzita zářivého toku.

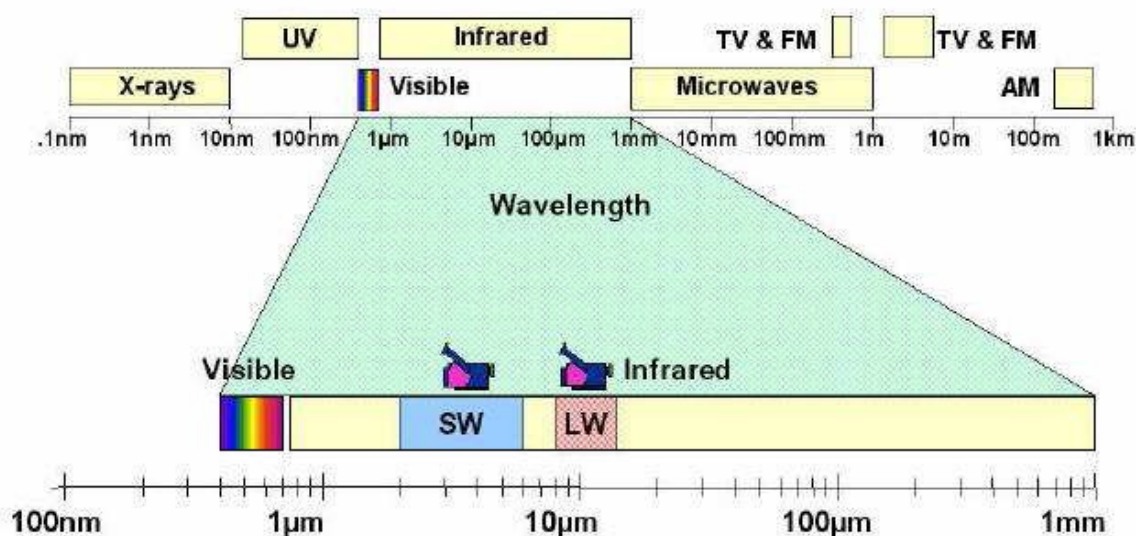
Zdrojem tepla jsou všechny objekty s teplotou vyšší než 0 K, přenos tepla se uskutečňuje radiací (sáláním) v IČ části ELMG spektra.

Zářivá energie je v IČ části spektra generována třemi typy zdrojů:

- luminiscenčními
- radiovými
- tepelnými

Infračervené spektrum

Infračervené záření je neviditelnou částí ELMG (elektromagnetického) spektra projevující se tepelnými účinky. Toto záření má vlnovou délkou v intervalu cca 0,78 μm až 1 mm, tedy mimo část viditelnou okem. Viditelné záření odpovídá rozsahu vlnových délek od asi 0,38 až 0,78 μm .



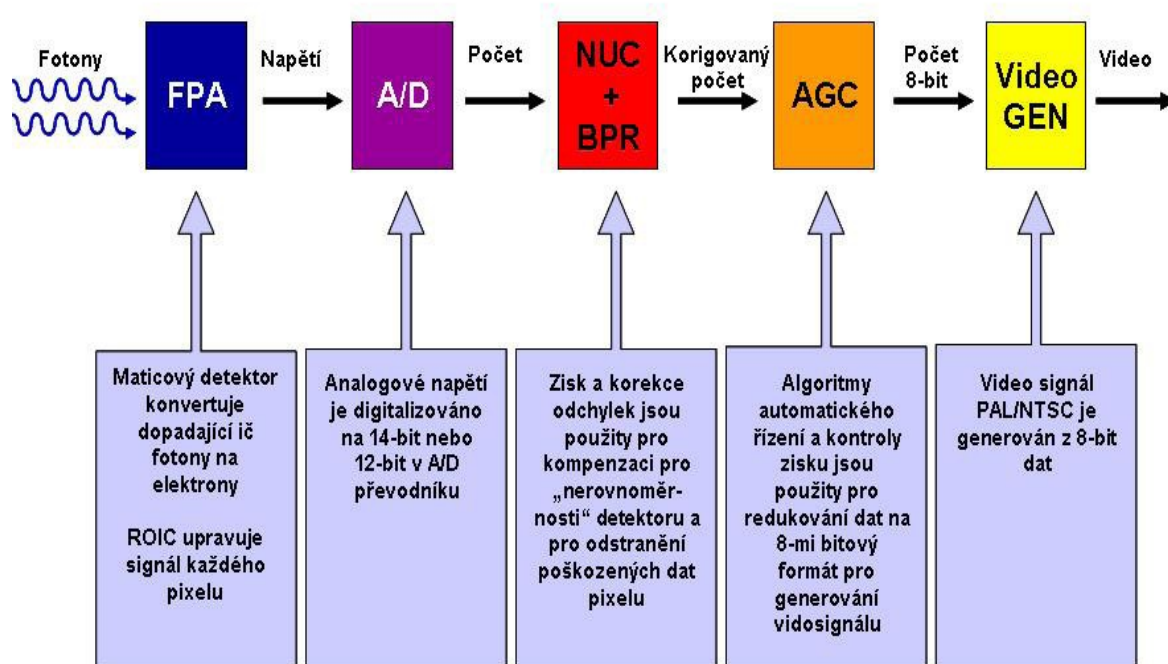
Obr 3.1 Elektromagnetické spektrum [5]

Infračervenou oblast ELMG spektra lze rozdělit na různé části. Přesné rozdělení není nikde určeno, ale nejčastěji je dělení viz. tab. 2.

Tab. 2 Rozdělení oblastí ELMG spektra [5]

Oblast	Vlnová délka	Používané zkratky
Blízká	0,75 μm - 2 μm	NWIR (Near Wave IR)
Krátkovlnná	2 μm - 3 μm	MWIR (Short Wave IR)
Střední	3 μm - 5 μm	MWIR (Middle Wave IR)
Vzdálená	5 μm - 15 μm	LWIR (Long Wave IR)
Velmi vzdálená	15 μm - 1 mm	VLWIR (Very Long Wave IR)

Termografie je nedestruktivní metoda založená na zobrazení a následném vyhodnocení teplotního pole (tzv. termogramu) povrchu testovaného objektu. U dotykových metod měření teplot lze pro získání termogramu použít indikátory na bázi kapalných krystalů se záznamem CCD kamerou. Fyzikálním základem bezdotykové termografie je měření povrchové teploty těles termografickou kamerou (termovizí) a to na základě infračerveného spektra elektromagnetického záření, vyzařovaného z povrchu tělesa v oblasti vlnových délek od 0,4 μm do 25 μm . Pro monitorování technického stavu objektu během provozu a pro nedestruktivní diagnostiku (defektoskopii) materiálu objektu se využívá krátkovlnná oblast infračerveného záření od 2 μm do 5 μm a dlouhovlnná oblast záření od 7 μm do 13 μm . V těchto pásmech se nacházejí tzv. atmosférická okna s přijatelnou prostupností záření ve vzduchu.



Obr. 3.2 Základní elektrické schéma termografického systému [5]

Emisivita

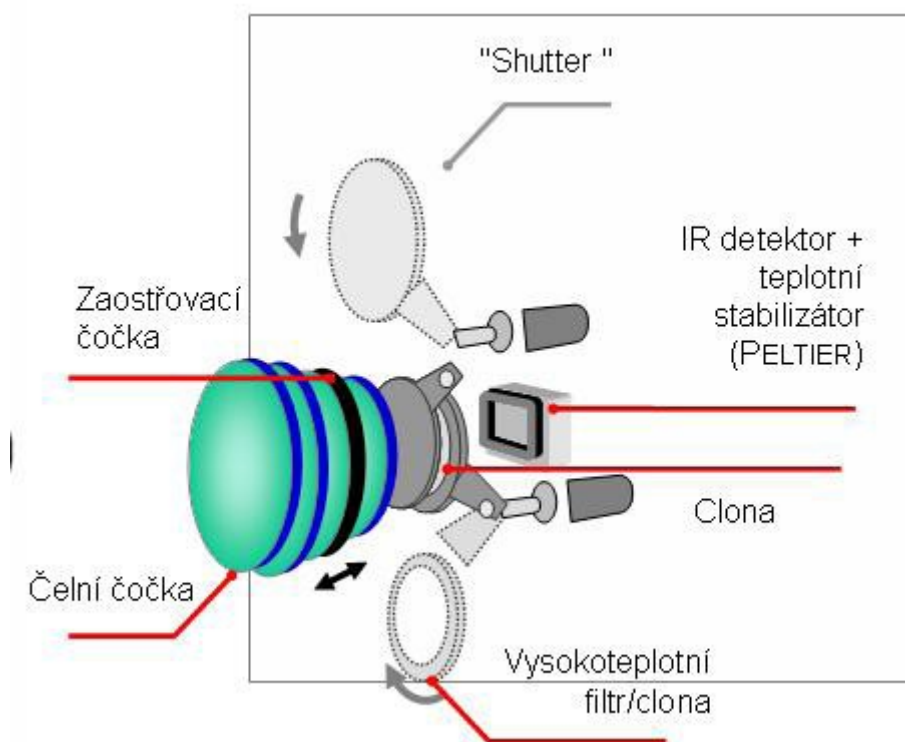
Emisivita – poměr vyzařování tepelného zářiče k vyzařování černého tělesa při stejné teplotě

Spektrální emisivita - poměr spektrální hustoty intenzity vyzařování tepelného zářiče ke spektrální hustotě vyzařování černého tělesa při stejné teplotě

Reálné zdroje záření nesplňují podmínku maximální absorpce záření z okolí, tj. $\alpha = 1$, pohltivost je u nich tedy menší než 1. Takové zdroje se označují jako *nečerná tělesa*. Podle závislosti pohltivosti α na vlnové délce se dělí na *šedé* a *selektivní* zářiče.

Selektivním spektrem se vyznačují plyny, naopak nejméně selektivním charakterem se vyznačují pevné látky s neleštěným povrchem.

Vyzařování běžně se vyskytujících materiálů z povrchu objektů se pohybuje v intervalu asi od 0,1 do 0,95. Silně vyleštěný povrch má emisivitu povrchu 0,1 a méně, zatímco zoxidovaný natřený povrch má emisivitu mnohem vyšší. Olejové barvy dosahují emisivity větší než 0,9, nezávisle na jejich barvě ve viditelném spektru.



Obr. 3.3 Optický systém s nechlazeným FPA detektorem [5]

3.1 Pasivní termografie

Pasivní termografie je zobrazování teplotních polí povrchů elektrických nebo mechanických objektů, jejichž činnost je spjata s vývinem nebo absorpcí tepla během provozu. Na termogramu lze zjistit míru opotřebení mechanického prvku jako je např. ložisko vlivem tření, převodovka, v elektrických zařízeních lze diagnostikovat příliš velký ohřev ztrátovým výkonem způsobeným elektrickým proudem a to na spojovacích svorkách kontaktů, na kontaktech silových spínačů, na izolátorech vysokého napětí, na vinutích elektromotorů atd.

U pasivní termografie jde o monitorování objektů v rámci preventivní údržby. Hodnotící veličinou jsou teplotní rozdíly na daných místech na povrchu objektu mezi teplotami naměřenými a teplotami přípustnými. Standardní programové vybavení kamer umožňuje vyhodnocení teploty v libovolném bodě obrazu, vyhodnocení střední a maximální teploty a vykreslení teplotního profilu v požadované oblasti, volitelné barevné zobrazení izoterem, korigovat vliv emisivity měřeného objektu, prostupnosti prostředí mezi kamerou a objektem, vliv teploty okolí aj. Pro nedestruktivní diagnostiku najde uplatnění např. při lokalizaci poškození tepelné izolace, koroze potrubí, vyždívek pecí aj. Nevýhodou pasivních metod je možnost chybného vyhodnocení termogramu vlivem artefaktů způsobených prostředím, prouděním vzduchu, nehomogenních hodnot emisivity.

3.2 Aktivní termografie

Aktivní termografie je realizována řízenou stimulací tepelné vlny v tělese, následném snímání rozložení teploty termografickou kamerou na povrchu tělesa a analýzou signálu. Defekty v podpovrchové vrstvě objektu se projevují diferenciemi v rozložení povrchové teploty. Zdrojem tepla, umístěného nejčastěji vně tělesa, je halogenová lampa, pulzní laser, výkonový blesk, xenonová výbojka nebo teplý proudící vzduch. Tepelné stimulace lze dosáhnout také vnitřním třením struktury hmoty tělesa prostupující ultrazvukovou vlnou, u elektricky vodivých objektů z externí cívky indukovaných vířivých proudů nebo rozkmitáním objektu. Známe-li vlastnosti materiálu, lze z tepelného obrazu vyhodnotit rozsah a hloubku podpovrchové vady teoreticky nebo porovnáním s etalonem.

Aktivní termografické metody dle způsobu stimulace a vyhodnocení termogramu můžeme rozdělit na:

- pulzní termografii
- lock-in termografii

3.2.1 Teorie tepelné vlny

Při modulovaném ohřevu povrchu tělesa úhlovou frekvencí ω se v podpovrchové vrstvě šíří tlumená a rozptýlená tepelná vlna. V rovinných vrstvách tělesa lze pro vyhodnocení teploty v v hloubce z a v čase t použít rovnici.

$$v(z,t) = v_0 e^{-\frac{z}{\mu}} \cos\left(\frac{2\pi z}{\lambda} - \omega t\right) \quad (3.1)$$

μ – hloubka vniku tepelné vlny, při které teplota klesne na $1/e$ v_0 , kde v_0 je teplota povrchu tělesa.

Platí vztahy:

$$\mu = \sqrt{\frac{2\kappa}{\omega\rho c}} = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} \quad (3.2)$$

$$\lambda = 2\pi\mu; \quad v = \lambda \frac{\omega}{2\pi} \quad (3.3)$$

$$\varphi(z) = \frac{2\pi z}{\lambda} = \frac{z}{\mu} \quad (3.4)$$

κ součinitel tepelné vodivosti

ρ hustota materiálu

c měrná tepelná kapacita

α součinitel teplotní vodivosti $\alpha = \frac{\kappa}{c\rho}$ (3.5)

v rychlost šíření tepelné vlny

λ tepelná vlnová délka

φ fáze tepelné vlny

Při modulační frekvenci $f' = 1$ Hz je např. hloubka vniku do oceli $\mu = 1,2$ mm a do hliníku $\mu = 5,6$ mm, při frekvenci $f = 0,03$ Hz je u oceli $\mu = 6,8$ mm a u hliníku $\mu = 32$ mm. Při analýze založené na změnách fáze lze odhalit vady do hloubky asi trojnásobku hloubky vniku. Ze vztahu 3.2 vyplývá, že vyšší modulační úhlová frekvence omezuje analýzu jen do oblasti těsně pod povrch, zatímco nižší frekvence zajistí průnik vlny hlouběji pod povrch, ale s nízkou rychlostí šíření vlny. Podobně jako ultrazvukové vlny se tepelná vlna v tělese odráží od strukturních anomálií v tělese (trhliny, nehomogenita atd.).

3.2.2 Pulzní termografie

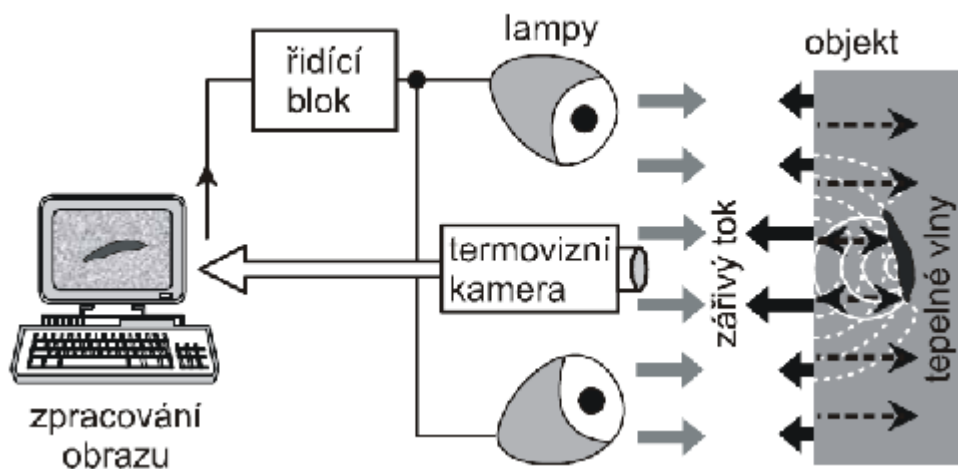
Podstata pulzní termografie je rychlý (pulzní) externí nebo interní ohřev tělesa a následném vyhodnocení tepelného pole na povrchu tělesa termokamerou. Podle uspořádání kamery, tělesa a zdroje ohřevu se metoda dělí na *reflexní* a *průchodovou*. Teplota povrchu tělesa se po řízené pulzní stimulaci vlivem rozptylu tepelné vlny, konvekci a vyzařováním rychle mění. Defekt v tělese zapříčiní snížení rychlosti šíření tepelné vlny a na teplotním poli na povrchu lze pak dle čela tepelné vlny sledovat oblasti s rozdílnou teplotou. V důsledku tohoto jevu defekty ve větší podpovrchové hloubce jsou viděny později a se sníženým kontrastem v obraze. Tento pokles kontrastu je úměrný třetí mocnině hloubky z.

Potřebná doba trvání pulzu záleží na difúzi tepla v materiálu tělesa resp. na hodnotě tepelné vodivosti. Pro materiály s vysokou hodnotou tepelné vodivosti, např. kovy, je potřebná doba trvání pulzu v řádech milisekund, u materiálů s nízkou hodnotou tepelné vodivosti, např. plasty a kompozity, je doba trvání pulzu v řádu sekund. Oteplení nesmí být větší než pár °C, protože řízený ohřev nesmí poškodit objekt. Pokud jsou v materiálu větší nehomogenity (trhliny, deformace) a jiné anomálie s rozdílnou tepelnou kapacitou, hustotou a tepelnou vodivostí, zobrazuje se tato skutečnost v určitém okamžiku jako odchylka v teplotním poli na povrchu objektu.

Pulzy mají nejčastěji obdélníkový průběh a jejich frekvenční spektrum je tvořeno řadou spektrálních složek s různou amplitudou. Z hlediska prostupující tepelné vlny lze uvažovat šíření vln o různých frekvencích s následným vyhodnocením fáze pomocí FFT analýzy, která je využívána u metody PPT (Pulsed Phase Thermography). Nevýhody pulzní termografie jsou stejné jako u pasivní termografie vliv prostředí, kmitání objektu a vliv emisivity povrchu tělesa.

3.2.3 Lock – in termografie

Z teorie signálu je známo, že modulací signálu je možno oddělit užitečnou složku signálu od složek rušivých. Lock – in termografie je založena na modulaci řízeného tepelného toku dopadajícího na diagnostikované těleso. Tepelná vlna proniká dovnitř tělesa a v místě změny prostředí tj. nehomogenita materiálu se odráží zpět k povrchu. Na povrchu tělesa dochází k interferencím vyzařovaného a primárního (dopadajícího) infračerveného záření. Termografickou kamerou snímané obrazce jsou modifikovány vracející se tepelnou vlnou zevnitř tělesa. Analýzou signálu z každého pixelu senzoru kamery jde stanovit odděleně amplitudu a fázový posun odezvy. Amplituda signálu z jednotlivých pixelů je ovlivněna nehomogenitou parametrů (emisivitou, pohltivostí) a nehomogenním rozložením ozáření povrchu objektu. Avšak ve fázové informaci jsou uvedené efekty vyloučeny a metoda lock – in dává nezkreslené informace o podpovrchové teplotě v diagnostikovaném tělese. Vyhodnocení amplitudy a fáze obrazového signálu je možno docílit různými způsoby jako jsou duální synchronní detekce, FFT analýza a nebo nejčastěji zpracování čtyř obrazů o 90° fázově posunutých.



Obr. 3.4 Uspořádání systému aktivní termografie [4]

3.2.4 Aktivní pulzní a lock – in ultrazvuková termografie

Výkonová ultrazvuková vlna prostupující materiálem má za následek rozkmitání částic hmoty a jejich vzájemným třením vzniká teplo. Tepelná odezva na nehomogenitu ve struktuře materiálu se šíří k povrchu tělesa a tepelný obraz je vyhodnocen termografickou kamerou. Výkonový ultrazvukový měnič (100 – 1000 W, frekvence 15 – 30 kHz) je umístěn přes laděný akustický nástavec. Tato kombinace je často označována jako sonotrode. U lock – in metody je generován modulovaný ultrazvukový signál (modulační frekvence 0,03 – 0,25 Hz). U pulzní metody je generována skupina impulzů, tj. jeden tzv. burst impulz o délce 10 ms až 10 s. Na rozdíl od klasické lock – in termografie nedochází k interferenci vln na povrchu tělesa a defekt nelze vyhodnotit z fáze vlny.

3.2.5 Aktivní termografie s využitím kapalných krystalů

Kapalné krystaly kapaliny, které si při rostoucí teplotě udržují do určité teploty molekulární orientaci při skupenské přeměně z pevné do kapalné fáze, tj. molekuly ve tvaru tyčinek se volně pohybují, ale udržují si směr.

Dopadá-li na objekt s nanesenou vrstvou kapalného krystalu bílé světlo, v kterém jsou všechny barevné složky a odrazí se např. pouze spektrum modré barvy, znamená to, že ostatní spektrální složky byly krystalem absorbovány a oko nebo CCD kamera registruje modré zabarvení objektu. U defektoskopie se využívá krystalů tzv. cholesterického typu.

3.2.6 Vibrotermografie

Princip vibrotermografie je založen na periodickém silovém namáhání tělesa přes řízený budič kmitů (20 – 50 Hz). Při průchodu mechanické napěťové vlny tělesem dochází vlivem vzájemného tření částic hmoty a pohlcování energie k transformaci mechanických vln na tepelné vlny, které se šíří tělesem k jeho povrchu. V místě defektu ve struktuře materiálu je větší hodnota mechanického napětí , což způsobí nárůst útlumu napěťové vlny a nárůst energie vln tepelných. Defekt má za důsledek také změnu tepelné vodivosti materiálu. Signál budiče o vysokých frekvencích je nízkofrekvenčně modulován. Teplotní pole na povrchu měřeného objektu je snímáno termografickou kamerou a vyhodnoceno lock – in měřícím systémem. Fázová informace z videosignálu zajistí optimální věrohodnost měření. [5]

4 Termografické měření pecí

Měření bylo realizováno ve firmě Siemens Elektromotory s.r.o. ve Frenštátě pod Radhoštěm dne 23.2. 2012. U měření byli také Ing. Ivo Vítek a vedoucí mé práce Ing. Jan Blata Ph.D.

Termodiagnostika byla aplikována na plynové peci BOTTA a elektrické peci STRIKO.

4.1 Technické údaje plynové pece BOTTA

Napětí	400 V
Instalovaný elektrický výkon	8 kW
Instalovaný tepelný výkon	550 kW
1. vyrovnávací hořák	320 kW
1. tavící hořák	230 kW
Zařízení stlačeného vzduchu – připojení na 3 / 4“ tlak 6 bar	

Popis hořáků a pece

Provozní teplota	750 °C
Maximální teplota	900 °C
Obsah pece	1200 kg
Výroba pece	300 kg/h

Řídící hydraulický transformátor

Maximální tlak	100 bar
Výkon motoru čerpadla	2.2 kW
Průtok čerpadla	16 l / min

Drapák

Ovládací válec k vyklopení drapáku:

Válec průměru	102 / 90 mm
průměr vřetena	50 mm
chod	615 mm

Spalovací zařízení

Skládá se ze spalovacího a vyrovnávacího hořáku.

Systém vyklopení drapáku (fáze vyprázdnění) se děje prostřednictvím činnosti hydraulických válců.

Hydraulický transformátor

Je odpovědný za činnost všech hydraulických výkonných mechanismů pece

2 řídicí válce k otevření dveřního otvoru pece (sázecí otvor)

1 řídicí válec zdvihu pece

1 řídicí válec vyklopení drapáku

Obsahuje také elektrický motor spojený s čerpadlem, nádrží na 80 l, skupinou elektrických ventilů, ukazatelem stupně hydraulické kapaliny, manometrem k zobrazení tlaku zařízení s příslušným regulátorem, filtr, čep k naložení a vyložení.

Všechny válce mají bezpečnostní ventil.

Rychlost posuvu výkonných mechanismů je upraven prostřednictvím regulátorů proudění taviva.

Používá se ohnivzdorná hydraulická kapalina typu glykol - voda HOUGHTO SAFE 620, která není výbušná.



Obr. 4.1 Plynová tavící pec Botta

4.2 Technické údaje elektrické pece STRIKO – typ WESTOMAT KBU 60/H

Rok výroby	1982
Napětí	400 V
Hmotnost	4200 kg
Výkon	93 kW

Parametry sklopného hydraulického kelímku pece s odporovým záhřevem

Obsah pece	600 kg
Výroba pece	250 kg / h
Spotřeba energie na roztavení 1 kg / Al	0,38 – 0,42 kWh
Topné těleso 3 kusy	31,7 x 610 x 1300 mm

Rozměry pece

Délka	2150 mm
Šířka	2300 mm
Výška	3500 mm



Obr. 4.2 Elektrická tavící pec Striko

4.3 Podmínky při měření

Při měření byly pece v běžném pracovním režimu. Podmínky byly stálé bez výkyvů teplot nebo jiných vlivů ovlivňujících výsledek měření. Venkovní teplota byla 3 °C a v hale, kde se nachází pece, byla teplota asi 25 °C ve vzdálenosti asi 3 m od pece.

4.4 Přístroje potřebné při měření

- Termokamera Fluke Ti32
- Program SmartView pro analýzu termogramů a tvorbu zpráv
- Digitální fotoaparát
- Teploměr

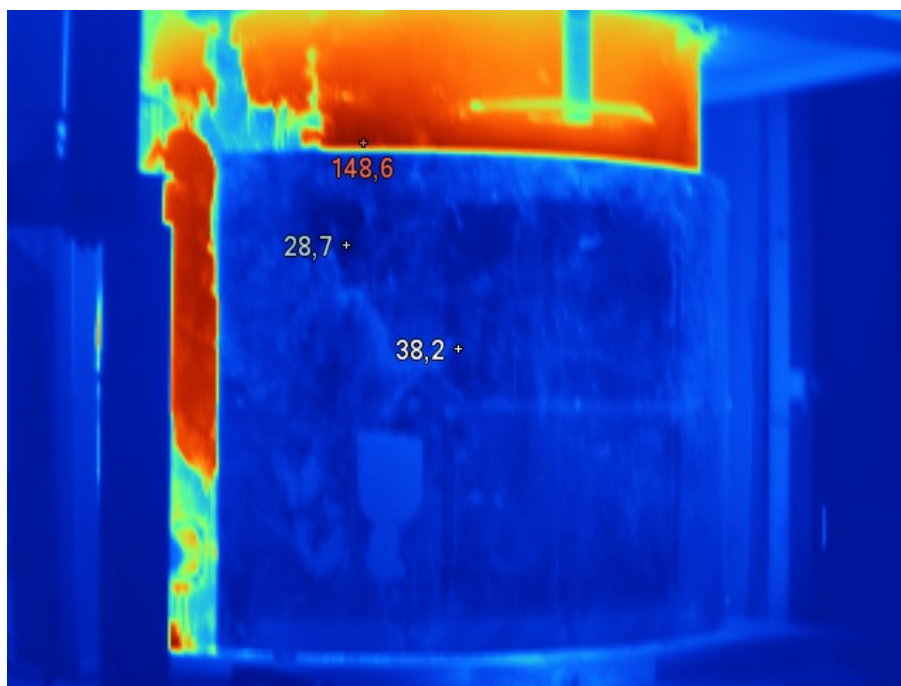


Obr. 4.3 Termokamera Fluke Ti32 [13]

Tab. 3 Technické parametry termokamery Fluke Ti32 [14]

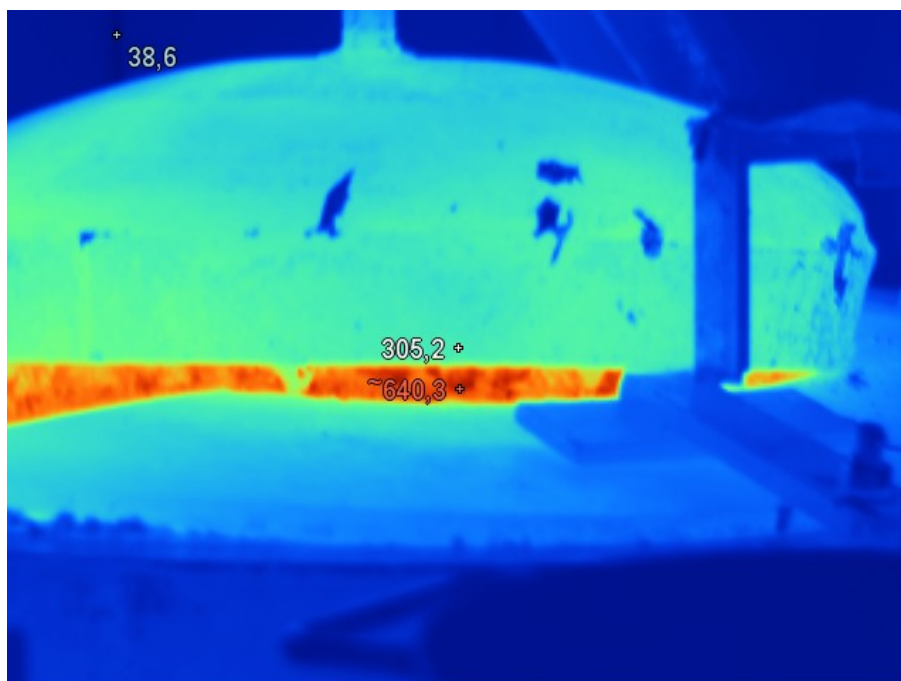
Teplotní parametry	
Tepelná přesnost (NETD)	< 0,05 °C při 30 °C
Teplotní rozlišení	0,05 °C
Minimální a maximální provozní teplota	-10 °C – 50 °C
Teplotní rozsah	-20 °C – 600 °C
Provozní parametry	
Korekce emisivity	0,01 – 1,0
Relativní vlhkost	10 % - 90 %, nekondenzovaná
Přesnost měření	± 2 °C
Optické parametry	
Detektor	320 x 240 FPA nechlazený mikrobolometr
Rozlišení displeje	640 x 480 pix.
Zorné pole	úhel záběru - 23° horizontálně a 17° vertikálně
Spektrální pásmo	7,5 – 14μm

4.5 Termodiagnostika pece Striko



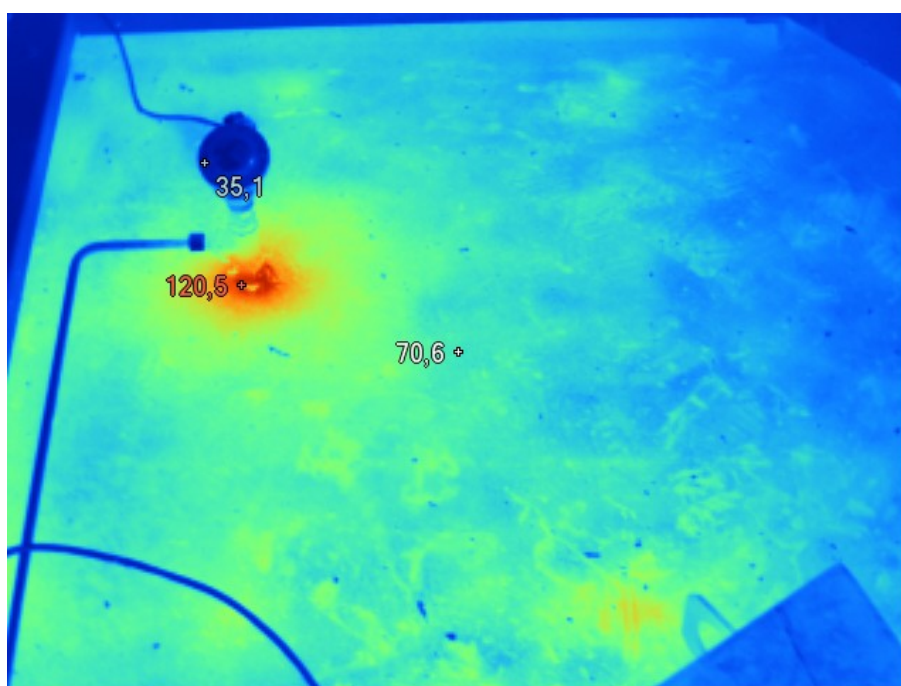
Obr. 4.4 Elektrická pec Striko

Ochranný plech zde není za účelem izolace, ale pouze jako snížení šíření tepla do prostoru sáláním. Skrz tento plech nelze měřit termokamerou, hodnoty nejsou příliš objektivní.



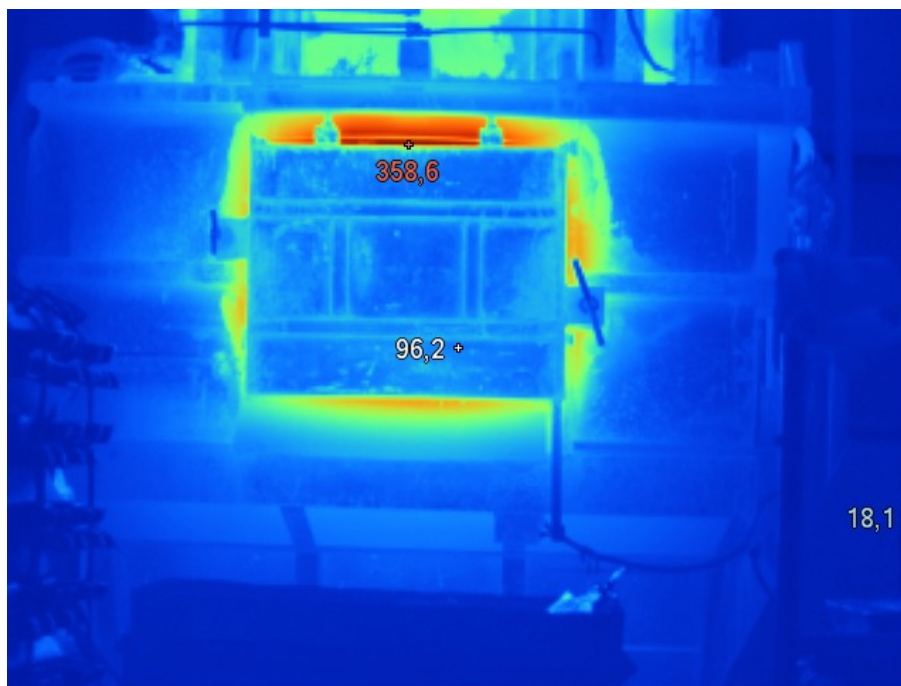
Obr. 4.5 Víko pece

Přes mezeru mezi víkem a pecí jsou značné úniky tepla, protože je zde mezera v řádech centimetrů a přes vylévací hrdlo, kterým teče roztavený kov do dávkovací pece, jsou taktéž výrazné tepelné úniky. Tato mezera vznikla provozem pece. Jsou zde používány žáruvzdorné a žáropevné materiály, ale časem došlo k částečné deformaci. Tyto deformace by mělo eliminovat těsnění mezi víkem a pecí.



Obr. 4.6 Teplotní čidlo

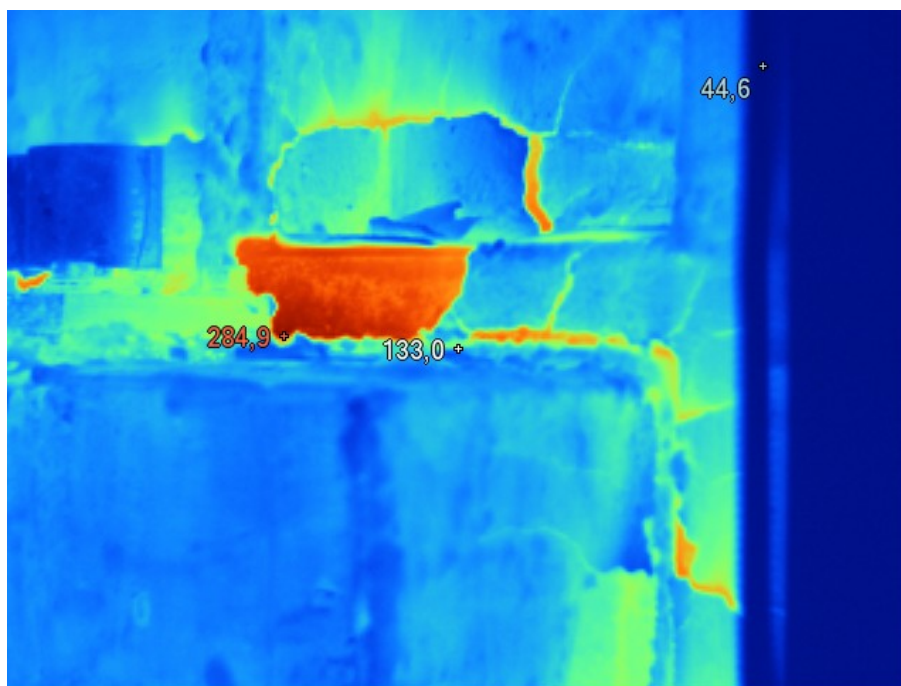
Zvýšená teplota kolem čidla je způsobená konvekcí tepla čidlem, zde bych doporučil dokonalejší utěsnění.



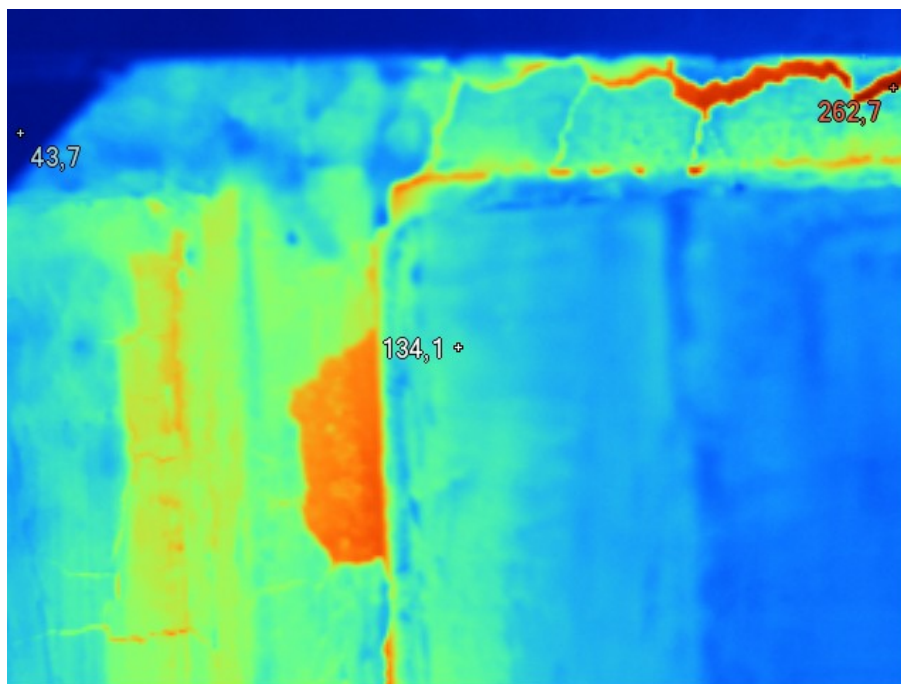
Obr. 4.7 Dvřka pece

Kolem dvřek pece je výrazný únik tepla, doporučil bych lépe utěsnit vhodnými izolačními materiály.

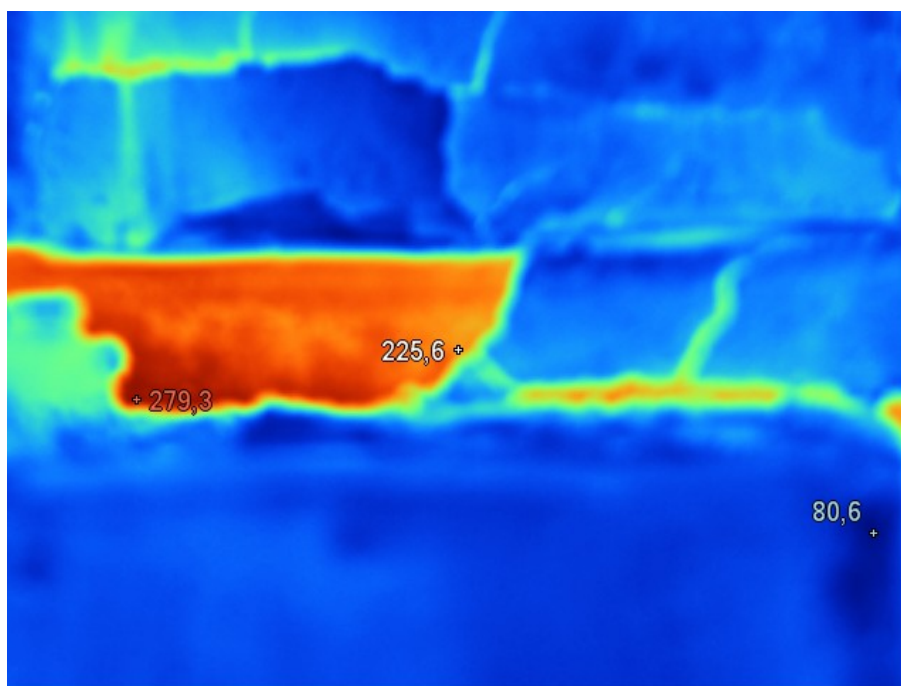
4.6 Termodiagnostika pece Botta



Obr 4.8

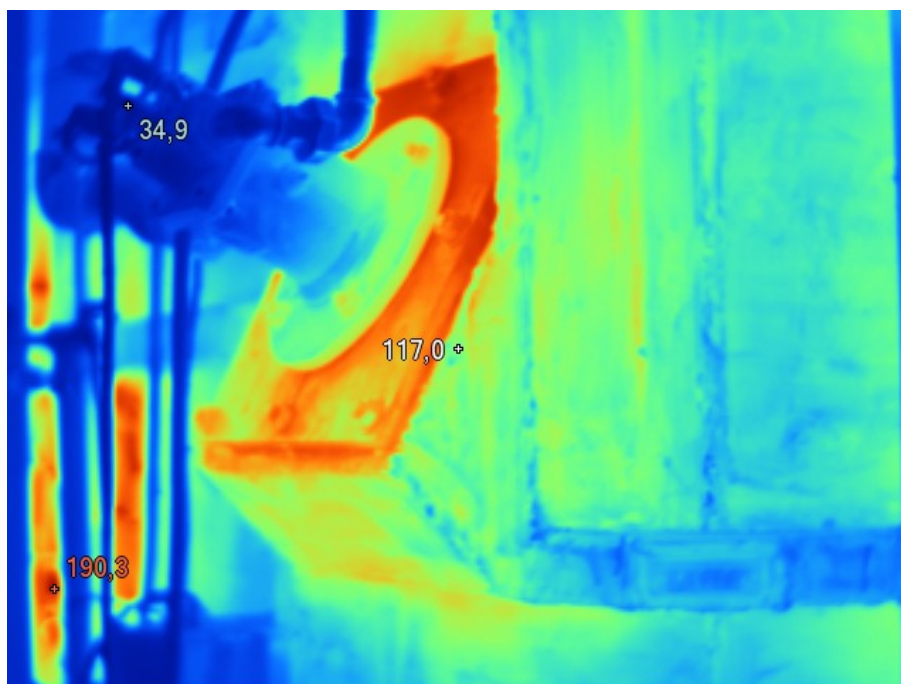


Obr. 4.9



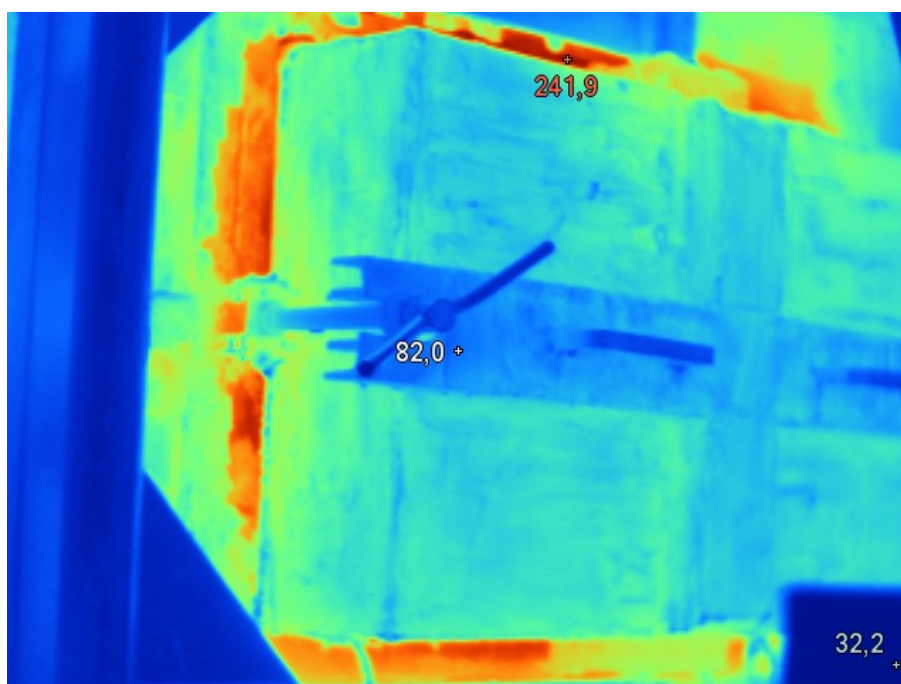
Obr .4.10

Plynová pec Botta je opatřena nátěrem Aerotherm, který snižuje únik tepla přes stěny pece. Tímto nátěrem by se únik tepla měl snížit as o 3 %. Návratnost této investice uvádí výrobce 4 – 6 měsíců. Na některých místech nátěr začal praskat a odpadávat. Na obr. 4.8, obr. 4.9 a obr. 4.10 je vidět výrazný teplotní rozdíl mezi částí pece s nátěrem a částí pece, kde již nátěr odpadl.



Obr. 4.11 Plynový hořák

Příruba hořáku má výrazně vyšší teplotu než stěna pece, protože zde není žáruvzdorná vyzdívka. Doporučil bych provést vhodnou izolaci.



Obr. 4.12 Dvířka pece

Podobně jako u elektrické pece, je zde také výrazný únik tepla kolem dvířek. Je třeba vhodně utěsnit mezeru mezi dvířky a pecí.

4.7 Vyhodnocení měření

Vzhledem k nepřetržitému provozu doporučuji pravidelnou kontrolu 2x za rok. Kontroly pokud možno stanovit tak, aby byla jedna provedena v teplých letních měsících a druhou kontrolu v zimních měsících. Sledovat vývoj teplot, zda-li při dvou po sobě následujících měření není zaznamenán velký rozdíl naměřených teplot.

Měření bylo provedeno na 2 pecích, elektrické a plynové. U elektrické pece termosnímkou odhalily výrazné tepelné úniky. Tyto úniky tepla je nutno odstranit. Doporučoval bych tyto místa vhodným způsobem izolovat. Největší úniky jsou u víka pece, ty jsou způsobeny velkou mezerou mezi pecí a víkem, která vznikla provozem pece. Víko je sice vyrobeno ze žáruvzdorného a žáropevného materiálu, ale časem došlo k částečné deformaci teplem. Tyto deformace by mělo eliminovat těsnění mezi víkem a pecí. Velká mezera je také mezi kanálkem pro přelévání taveniny do udržovací pece a víkem. V tomto případě se jedná o konstrukční problém, kde bych doporučil k víku pece připevnit uzávěr, který by uzavřel lící kanálek a zmírnil úniky.

U plynové pece opatřené nátěrem Aerotherm, došlo k praskání a odpadávání tohoto nátěru.

U obou pecí je problém s nadměrným únikem tepla okolo dvířek pecí, zde je třeba zvolit vhodné těsnění.

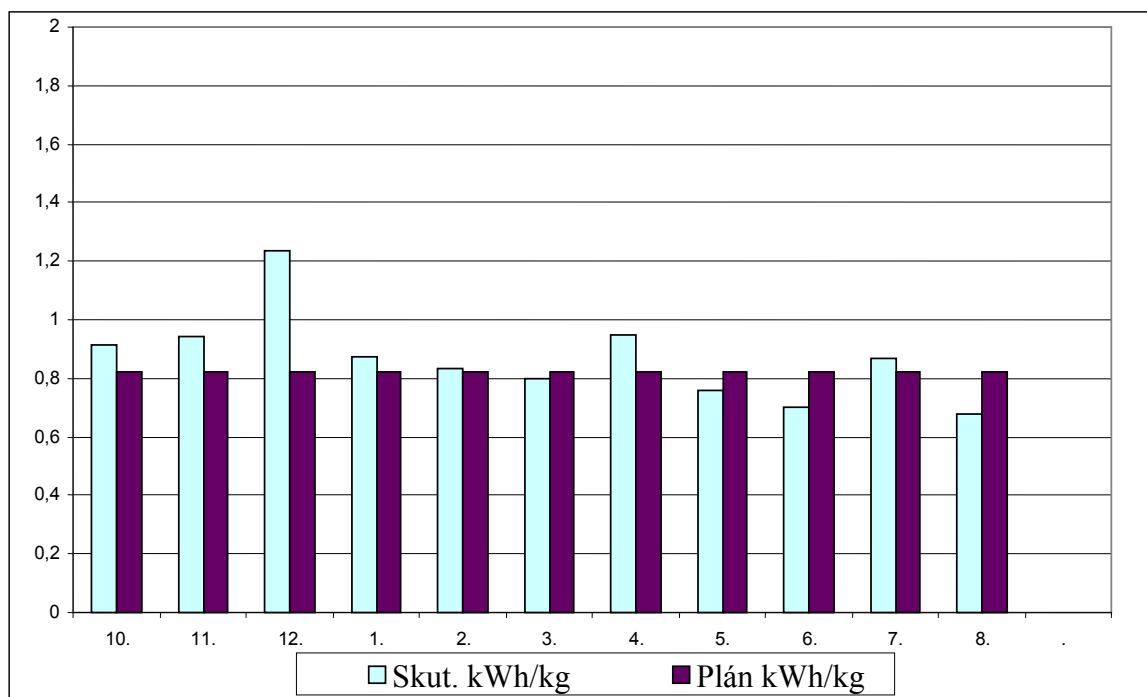
Ani u jedné z pecí nebylo zjištěno porušení žáruvzdorné vyzdívky.

5 Ekonomické porovnání elektrické a plynové pece

Elektrická pec Striko – Westofen

10/10 - 8/11			Elektrická energie		
Zařízení	Elektrická tavní pec		TCS I		
Název	WESTOFEN		+ 40% znovu použitého Al		
	Spotřeba	Spotřeba	Vytaveno Al	EN	
	EE	Al		Skut.	Plán
Měsíc	kWh	kg	kg	kWh/kg	kWh/kg
10.	19 140	14 932	20 905	0,92	0,82
11.	18 340	13 862	19 407	0,95	0,82
12.	19 460	11 247	15 746	1,24	0,82
1.	16 000	13 085	18 319	0,87	0,82
2.	16 140	13 799	19 319	0,84	0,82
3.	18 300	16 380	22 932	0,80	0,82
4.	17 640	13 290	18 606	0,95	0,82
5.	18 420	17 329	24 261	0,76	0,82
6.	19 100	19 503	27 304	0,70	0,82
7.	18 020	14 791	20 707	0,87	0,82
8.	19 880	20 990	29 386	0,68	0,82
Celkem	200 440	169 208	236 891	0,85	0,82

Tab. 4 Spotřeba energie pece Striko



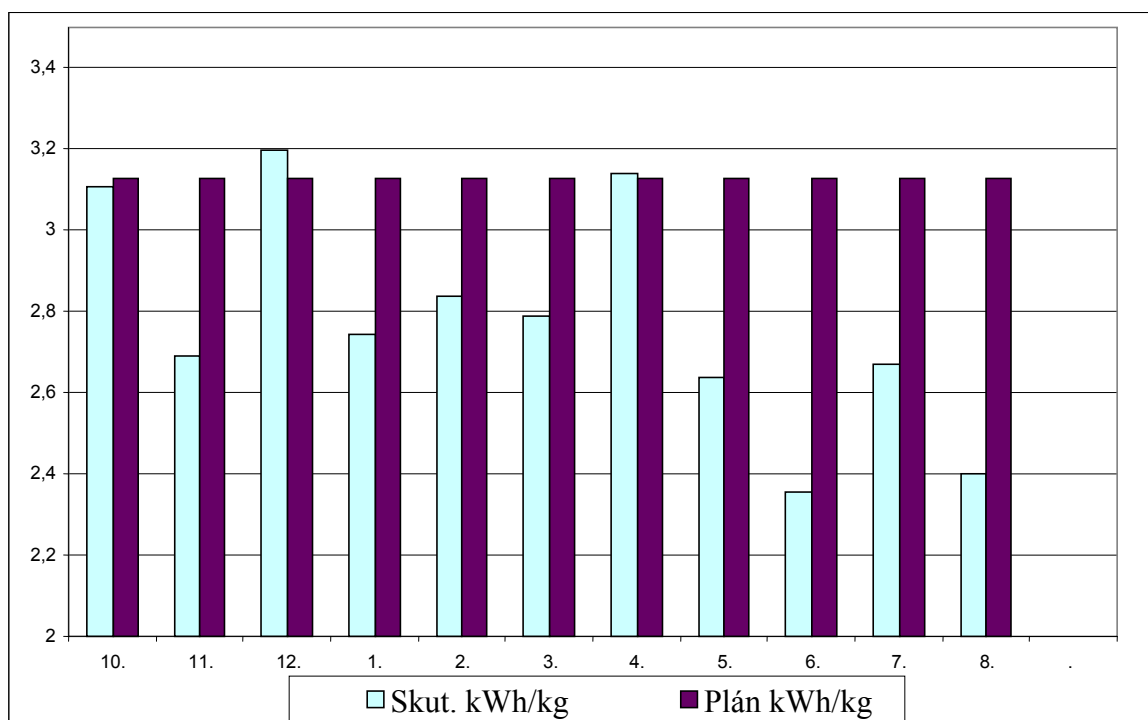
Obr. 4.16 Spotřeba elektrické energie skutečná a plánovaná

Za sledované období (říjen 2010 – srpen 2011) bylo vytaveno pecí Striko – Westofen 236 891 kg hliníku, přičemž do každé tavby bylo přidáváno 40 % hliníkových zbytků z minulých taveb. Spotřeba energie pro toto období činí 200 440 kWh. Při ceně elektrické energie 2,40 CZK / 1 kWh, vychází cena spotřebované energie 481 056 CZK. Potom tedy cena na vytavení **1 kg Al = 2,03 CZK**.

Plynová pec Botta

10/10 – 8/11			Zemní plyn		
Zařízení	Plynová tavící pec		TCS III		
Název	BOTTA 2		+ 40% znovu použitého Al		
	Spotřeba	Spotřeba	Vytaveno Al	EN	
	ZP	Al		Skut.	Plán
Měsíc	kWh	kg	kg	kWh/kg	kWh/kg
10.	117 472	26 995	37 793	3,11	3,13
11.	111 746	29 645	41 503	2,69	3,13
12.	101 005	22 552	31 573	3,20	3,13
1.	114 473	29 785	41 699	2,75	3,13
2.	103 439	26 051	36 471	2,84	3,13
3.	114 735	29 404	41 166	2,79	3,13
4.	108 206	24 612	34 457	3,14	3,13
5.	99 767	27 020	37 828	2,64	3,13
6.	93 540	28 353	39 694	2,36	3,13
7.	84 675	22 638	31 693	2,67	3,13
8.	99 292	29 524	41 334	2,40	3,13
Celkem	1 148 349	296 579	415 211	2,77	3,13

Tab. 5 Spotřeba energie pece Botta



Obr. 4.17 Spotřeba plynu skutečná a plánovaná

Za sledované období (říjen 2010 – srpen 2011) bylo vytaveno pecí Botta 415 211 kg hliníku a opět zde bylo přidáváno do každé tavby 40 % hliníkových zbytků z minulých taveb. Spotřeba energie pro toto období činí 1 148 349 kWh zemního plynu. Množství plynu se zde neudává v m³, ale v kWh, kde 1 kWh (3,6 MJ) = energie spotřebované zařízením s příkonem 1 kW po dobu jedné hodiny. Při ceně 0,80 CZK / 1 kWh zemního plynu, vychází cena spotřebovaného plynu 918 680 CZK. Potom je tedy cena na vytavení **1 kg Al = 2,21 CZK.**

Pro vytavení 1 kg Al vyšla lépe elektrická pec, která má být nahrazená plynovou. Pro přesné vyhodnocení celkových nákladů na provoz obou pecí by bylo třeba zahrnout celou řadu dalších výdajů spojených s provozováním pecí, jako např. cena údržby, cena náhradních dílů, poruchovost pecí a následná cena oprav, potřebné množství pracovníků pro obsluhu atd. Toto ovšem nebylo náplní bakalářské práce a bylo by to časově náročné a zdlouhavé.

6 Návrh nové pece dle parametrů

Elektrická pec Striko již neplní v současné době požadavky firmy Siemens a prostřednictvím bakalářské práce, mělo dojít k návrhu možné náhrady.

Požadavky podniku na novou pec:

- palivo - zemní plyn
- minimální tavící výkon 400kg / h
- kapacita pece 1200 kg
- minimální tavící teplota 850°C
- akustické upozornění na náhlý pokles teploty pod určitou teplotní hranici
- plnění předepsaných emisních limitů
- dostupnost náhradních dílů
- servis v ČR
- při poruše - reakce do 24 hodin
- montáž pece a uvedení do provozu

Dále bylo třeba pec navrhnout tak, aby nezasahovala do jeřábové drážky a rozměrově se vlezla do pracoviště TCS1.

Byly osloveny 4 firmy zabývající se výrobou či distribucí tavících pecí:

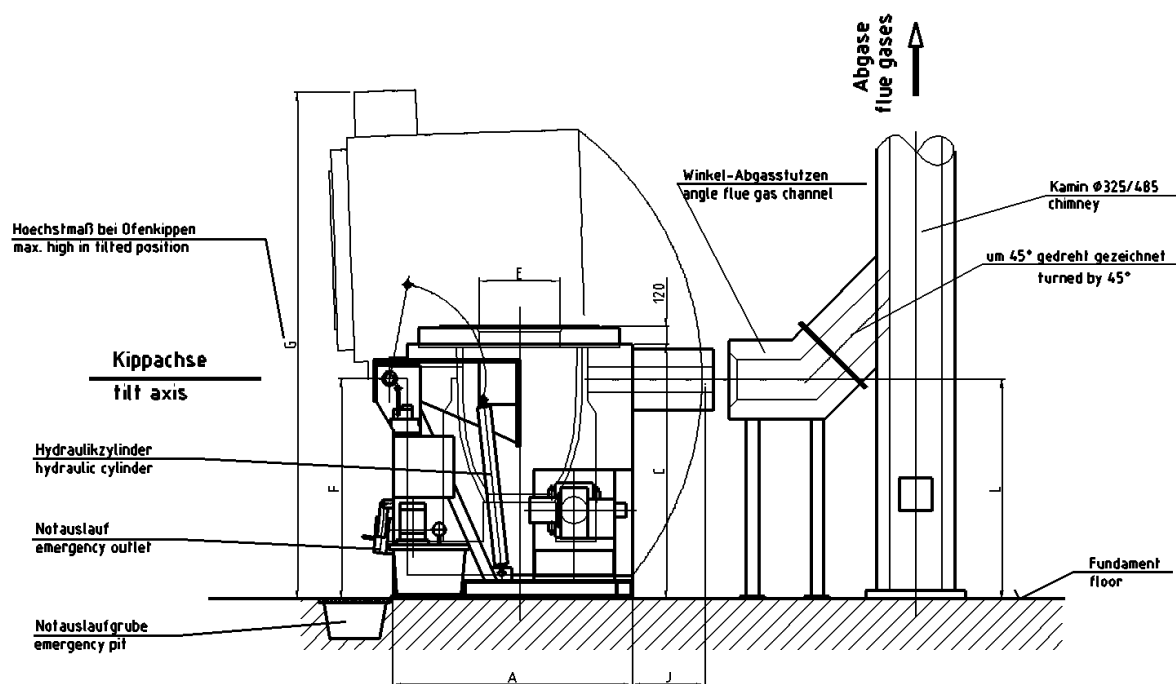
1. Realistic - průmyslové plynové a elektrické pece, bohužel nenabízela pec požadovaných parametrů.
2. Šebesta – Služby slévárnám s.r.o.
3. Artik studio s.r.o.
4. FuG Feuerfest - und Giessereibedarf GmbH

Na zadanou poptávku reagovala pouze firma Šebesta – Služby slévárnám s.r.o. Zaslala nabídku kelímkové sklopné pece Striko CMHG - T 800 s následujícími parametry:

Kelímková sklopná pec Striko CMHG - T 800

Technické parametry:

- Kapacita 800 kg Al
- Typ kelímku TP 800
- Rozměry kelímku Ø 890/450 x 1000 mm
- Podložka kelímku Ø 450 x 300 mm
- Maximální teplota taveniny 900 °C
- Tavicí výkon 360 kg Al/h
- Doba tavby cca. 83 min
- Spotřeba plynu 1,26 kWh/kg Al
- Příkon hořáku 465 kW
- Výhřevnost plynu 9,3 kW/m³N
- Dynamický tlak plynu 25 mbar
- Elektrický příkon 2,5 kW
- Napájecí proud 3/380 - 400 V/N/PE, 50 Hz
- Řídící napětí 230 V, 50 Hz
- Hmotnost pece (bez kelímku) 4300 kg



Obr.4.18 Plynová pec Striko – CMHG – T800

Tab. 6 Porovnání parametrů plynových pecí Botta a Striko

Parametry	Pec Botta	Pec Striko - CMHG-T800
Maximální teplota	900 °C	900 °C
Kapacita pece	1200 kg	800 kg
Tavný výkon	300 kg/h	360 kg /h
Spotřeba plynu	2,77 kWh/kg	1,26 kWh/kg
Napětí	400 V	400 V
Příkon hořáků	550 kW	465 kW

7 Závěr

Termodiagnostická měření byla provedena na 2 pecích, elektrické a plynové. U elektrické pece byly zjištěny výrazné tepelné úniky, které je třeba odstranit. Doporučoval bych tyto místa vhodným způsobem dotěsnit. U víka pece je výrazný únik tepla, ten je způsoben mezerou mezi pecí a víkem, která vznikla provozem pece. Jsou zde sice používány žáruvzdorné a žáropevné materiály, ale časem došlo k částečné deformaci. Tyto deformace by mělo eliminovat těsnění mezi víkem a pecí. Velká mezera je také mezi kanálkem pro přelévání taveniny do udržovací pece a víkem. Zde je ovšem problém konstrukční. Zde bych doporučil k víku pece připevnit uzávěr, který by uzavřel licí kanálek a zmírnil úniky.

U plynové pece nastal problém pouze s praskajícím a odpadajícím nátěrem Aerothrm. Obě pece měly zvýšený únik tepla okolo dvířek pecí, zde je třeba zvolit vhodné těsnění. U pecí nebylo zjištěno porušení žáruvzdorné vyzdívky.

Dále jsem se zabýval porovnáním spotřeby energie a náklady na vytavení 1 kg Al elektrické a plynové pece. Úniky tepla se dosti odráží ve spotřebě energie. U elektrické pece uvádí výrobce spotřebu energie na vytavení 1 kg Al 0,38 – 0,42 kWh / kg, ale energetické údaje poskytnuté firmou Siemens Elektromotory na vytavení 1 kg Al jsou téměř dvakrát tak velké. Průměrná spotřeba energie činí 0,77 kWh / kg.

Na vytavení 1 kg Al vyšla elektrická pec o 0,18 CZK / kg levněji než pec plynová. Nutno ovšem započíst i mnoho dalších výdajů ovlivňujících celkové náklady na provoz pece např. cena náhradních dílů, poruchovost pece, cena údržby, potřebný počet zaměstnanců pro obsluhu pece atd. Vypočítat celkové náklady však nebylo náplní bakalářské práce a bylo by to časově náročné.

V závěru bakalářské práce ještě navrhuji vhodnou náhradu za již dosluhující elektrickou pec. Nová pec měla odpovídat požadovaným parametrům a rozměrům pracoviště TCS1.

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Janu Blatovi Ph.D. za cenné rady, věnovaný čas a trpělivost při psaní bakalářské práce. Dále děkuji za spolupráci mému konzultantovi Ing. Svatopluku Sommerovi a Ing. Ivo Vítkovi za poskytnutí informací k dané problematice. Také bych rád poděkoval firmě Siemens Elektromotory s.r.o ve Frenštátě pod Radhoštěm.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY:

- [1] PŘÍHODA, M.; HAŠEK, P. *Hutnické pece*. 1. vyd. Ostrava, Ediční středisko VŠB, 1983. 367 s.
- [2] KUBÁNEK, B. *Tepelné hospodářství a pece, 4. díl*. 1. vyd. Ostrava, Ediční středisko VŠB, 1953, 197 s.
- [3] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 148 s. ISBN 80-214-2790-6.
- [4] KREIDL, Marcel. *Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu*. 1. vyd. Praha: BEN, 2006, 406 s. ISBN 80-730-0158-6.
- [5] HELEBRANT, F.; MONI, V.; BLATA, J.: *Termografie*. Studijní podklady, Ostrava 2010, 69 s.
- [6] GEOLOGIE VSB *Schéma indukční kelímkové pece* [online]. [cit. 2012-02-18]. Dostupné z www: <http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/vyroba_zeleza.html>.
- [7] MMSPEKTRUM. *Obrábění paprskem iontů – plazmatem* [online]. [cit. 2012-02-13]. Dostupné z www: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-8-dil.html>>.
- [8] PUSTKA, M. *Laboratorní plazmová pec s horizontálním krystalizátorem: Diplomová práce* [online]. Ostrava: VŠB-TUO, FS. [cit. 2012-04-10]. Dostupné z www: <https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/88025/PUS077_FS_N2301_3909T001_20_2011.pdf?sequence=1>.
- [9] ČVUT. *Indukční ohřev* [online]. [cit. 2012-01-09]. Dostupné z www: <http://panther.feld.cvut.cz/cs/wiki/indukcni_ohrev>.

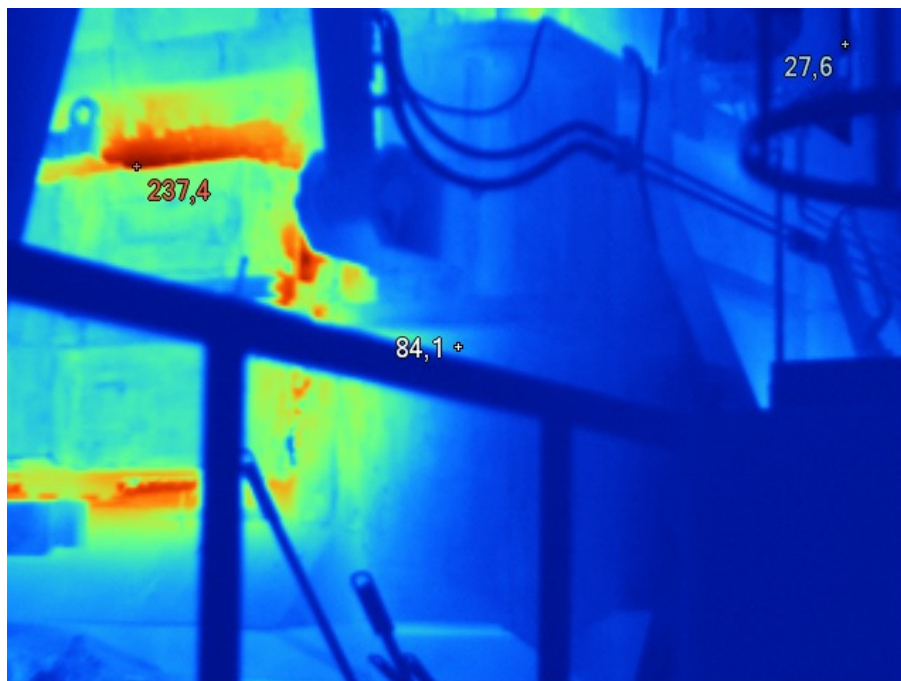
- [10] KSP TU-LIBEREC *Zařízení pro ohřev materiálu* [online]. [cit. 2012-01-09]. Dostupné z www: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm>.
- [11] Podklady firmy Šebesta - služby slévárnám s.r.o. Brno
- [12] TIESSE. *Krownmatic – Dávkovací pece KM* [online]. [cit. 2012-03-15]. Dostupné z www: <<http://www.tiessepraha.cz/slevarenstvi-krown-tlakove-liti>>.
- [13] GHV TRADING. *Ti32 termokamera* [online]. [cit. 2012-05-01]. Dostupné z www: <<http://www.ghvtrading.cz/merici-pristroje/infrakamery/fluke-ti32.html>>.
- [14] BLUE PANTHER. *Termovizní kamera Fluke Ti32* [online]. [cit. 2012-03-29]. Dostupné z www: <<http://www.blue-panther.cz/fluke-ti32>>.

Seznam příloh

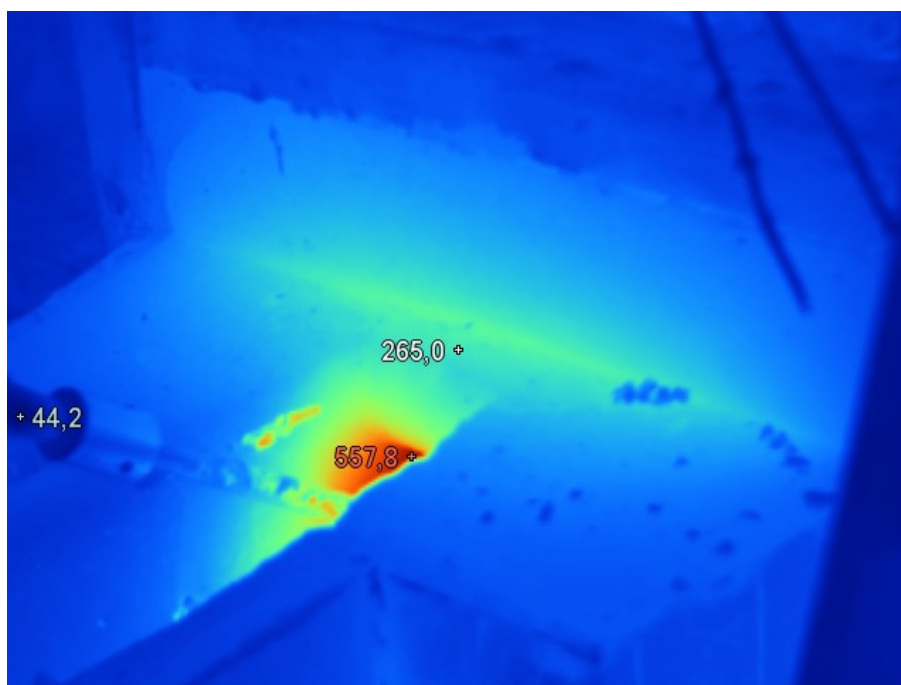
Příloha 1 Termosnímký plynové pece Botta

Příloha 1

Termosnímky plynové pece Botta



Obr. 1



Obr. 2